永磁自锁型电磁气门驱动装置

A Self-Locking Permanent Magnet Electromagnetic Valve Actuation

学科专业：　电气工程
研 究 生：　郭喜彬
指导教师：　陈益广　教授

天津大学电气与自动化工程学院

二零一一年十二月

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得 **天津大学** 或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：　　签字日期：　　年　　月　　日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 **天津大学** 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 **天津大学** 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：　　导师签名：

签字日期：　　年　　月　　日　　签字日期：　　年　　月　　日

摘要

提出了一种永磁自锁型电磁气门驱动装置，它是在传统双弹簧、双电磁铁电磁气门驱动机构的原理上引入了永磁体。该装置在气门完全关闭或完全开启的状态下，线圈不通电，利用永磁体产生的电磁吸力实现自锁，气门保持在全开或全闭的位置；气门解锁时，线圈通入起去磁作用的电流削弱衔铁气隙处永磁磁场，在双弹簧作用下衔铁释放，并向另一侧自锁位置运动，运动时通电线圈与动子上的永磁体之间形成一台直线电动机，电能转化成机械能，补充运动过程中的机械损耗；整个运动过程，动子近似做简谐振荡运动，振荡频率与弹簧的固有振荡频率相近。与传统的由凸轮轴驱动的内燃机气门控制系统相比，电磁气门控制系统省去了效率低下的机械传动装置，降低了附加损耗，同时提高了气门正时控制的灵活性，有效地提高了内燃机的燃烧效率，降低了废气排放。

首先，针对现有电磁气门驱动装置存在的优缺点，建立起全新的永磁自锁型电磁气门模型。其基本思想是不仅使气门运动时具有较快的响应速度，而且在气门开启或关闭时，电磁线圈无需通入电流能保持自锁，降低能量损耗。

其次，分别对新型永磁自锁型电磁气门模型进行有限元分析分析和计算。通过对各种模型的仿真，确定了机构中弹簧的刚度系数、内外铁心的厚度、永磁体的长度、附加气隙的大小等结构参数，并阐述了这些参数选取的原则。

最后，通过电磁场分析，运用能量摄动等相关算法，分别根据仿真得到的数据对永磁自锁型电磁气门的电磁力、电感、感应反电动势等重要参数进行了计算，并与目前现有电磁气门的参数做对比，结果表明所提出的永磁型电磁气门方案的正确和可行。

关键词：电磁气门；直线电机；电磁力；能量摄动法

ABSTRACT

A self-locking permanent magnet electromagnetic valve actuation is proposed. The so-called permanent magnet latching electromagnetic valve, brings permanent magnets into the traditional dual spring, dual solenoid valve drive mechanism, which can provide the electromagnetic force to achieve self-locking in the valve fully closed or fully open state, to keep valve at that fully open or fully closed position. Valve is unlocked only access to the magnetic effect current to weaken the air-gap magnetic field. Compared with the traditional engine valve driven by the camshaft control systems, the EMVA control system eliminates the inefficient mechanical transmission device, reduces the additional loss, at the same time, improves the control flexibility and the engine's combustion efficiency effectively, and reduces emissions. Therefore, the EMVA has a good economic and environmental benefits.

Firstly, in accordance with the existing strengths and weaknesses of current electromagnetic valve actuation, a new permanent magnet latching electromagnetic valve model is established, the basic idea is to make the valve not only has the fast response, but also keep the valve self-locking in open or close position without the need to maintain access current, reducing energy consumption.

Secondly, calculates the new permanent magnet electromagnetic under the static and dynamic station respectively by the finite element analysis software professional.

Finally, the electromagnetic force, inductance, EMF and other important parameters are obtained through analysis, calculations, which providing direct and effective basis to verify the correctness and feasibility of the electromagnetic valve.

KEY WORDS: Electromagnetic valve actuation; Linear motor; Electromagnetic force; Energy perturbation method

目　录

第一章 绪 论.....1

1.1 引言.....1

1.2 课题背景与选题意义.....1

1.2.1 电磁气门驱动装置简介.....1

1.2.2 电磁气门驱动装置的特点.....4

1.3 电磁气门驱动装置相关研究.....6

1.3.1 国内发展状况.....6

1.3.2 国外发展状况.....7

1.4 论文的主要研究工作.....8

第二章 永磁自锁型电磁气门驱动装置综述.....10

2.1 引言.....10

2.2 永磁自锁型电磁气门驱动装置简介.....10

2.3 永磁自锁型电磁气门驱动装置的结构设计.....14

2.3.1 弹簧的选择.....14

2.3.2 静子铁心的尺寸的确定.....15

2.3.3 永磁体的选取.....15

2.3.4 附加气隙δ'的确定.....15

2.3.5 永磁自锁型电磁气门驱动装置的参数.....16

2.4 永磁自锁型电磁气门的工作原理.....17

2.5 本章小结.....18

第三章 永磁自锁型电磁气门的性能分析.....20

3.1 引言.....20

3.2 电感.....22

3.2.1 一般的能量摄动法计算电感.....22

3.2.2 改进的能量摄动法计算电感.....23

3.3 空载反电动势.....25

3.3.1 有限元法计算感应反电动势.....25

3.3.2 瞬时功率法估算空载反电动势.....27

3.4 动子所受的力.....28

3.5 本章小结 30
第四章 永磁自锁型电磁气门驱动装置的仿真分析 32
4.1 引言 32
4.2 电磁场的有限元分析法 32
4.2.1 有限元分析法的起源和发展历程.....33
4.2.2 有限元分析法的基本思想和原理.....33
4.2.3 有限元分析法的优点及其在工程实际中的应用.....34
4.3 电磁气门驱动装置的动态模型有限元仿真分析和计算 35
4.3.1 单个电磁驱动装置的电磁力.....36
4.3.2 单个电磁驱动装置的电磁力的分解.....38
4.3.3 上下对置的两个电磁驱动机构的电磁力.....39
4.4 本章小结 40
第五章 总 结.....42
参考文献.....44
发表论文和科研情况说明.....48
致 谢.....49

第一章 绪 论

1.1 引言

迫于经济，特别是全球变暖石油枯竭等各方面的原因，内燃机一直在试图提高燃料燃烧效率。传统内燃机使用机械凸轮连杆气门系统，气门进排气时间只能由凸轮的形状和相位角确定，而不能根据燃料充分燃烧、低排放、最大转矩等因素来选择最佳时机，导致内燃机在较宽速度范围内效率低[1-5]。增添机械可变气门正时机构后，内燃机性能有所改善，但是与电磁驱动气门机构相比还欠灵活。于是，具有可独立、灵活控制等优点的电磁气门驱动装置应运而生。内燃机改用电磁驱动气门后，不仅省去凸轮连杆机构，简化系统结构，而且由于气门可独立控制完成正时，内燃机转矩输出提高，燃料消耗可减少高达 15%，有害排放也大大降低[6-7]。所以，电磁气门驱动装置在近些年来所受到的关注和重视程度也日益增加，逐渐成为了各国研究人员眼中的一个研究热点。

1.2 课题背景与选题意义

1.2.1 电磁气门驱动装置简介

电磁气门驱动装置（Electromagnetic Valve Actuation，简称 EMVA），是可变气门正时（Variable Valve Timing，简称 VVT）技术的最新研究方向，它取消了传统内燃机复杂的凸轮连杆装置，利用电与磁场的相互转化和作用，直接驱动气门的开启和关闭，减小了机械摩擦损耗，实现了节能减排。

电磁气门大致经历了无弹簧、单弹簧、双弹簧三个发展阶段[8-9]。

无弹簧装置结构简单，只由上下对置的两个电磁铁和连接气门做往复运动的衔铁等组成，气门落座时以很大的速度直接撞击落座圈，装置磨损严重，且由于没有起能量储存作用的弹簧，耗能很大，不经济，因此现在基本无人再研究这种结构。

后来出现了单弹簧机构，该装置由一个电磁铁、一个与气门相连接做往复运动的衔铁和一个储能弹簧组成，弹簧的作用是缓冲、储能，减轻了碰撞，提高了

气门的使用寿命。但是，单弹簧的缺点是响应速度比较慢，不能满足汽车高速运转的工况[10]。

为了解决单弹簧的上述问题，双弹簧结构被提了出来。这样，两个弹簧相当于并联，系统固有震荡周期减小为原来的$1/\sqrt{2}$，既提高了气门的响应速度，又使得气门运动控制起来更加灵活。目前，这种双弹簧、双线圈的电磁气门驱动机构逐渐得到了大多数人的认可。由此可见，电磁气门从最开始单弹簧、单磁铁的结构，演变为现在被大多数人所接受的双弹簧、双磁铁结构，是许多专家呕心沥血、精益求精的结果。

最早的电磁气门设计是由 FEV Motorentechnik 公司的工程师于 1984 年提出并申请专利，其结构示意图如图 1-1 所示[11]。这种线性电磁驱动器可以满足内燃机气门快速响应的需求，而且成本低，适合大规模生产，因此，随后众多汽车公司根据这种设计发展了各自的电磁气门装置。

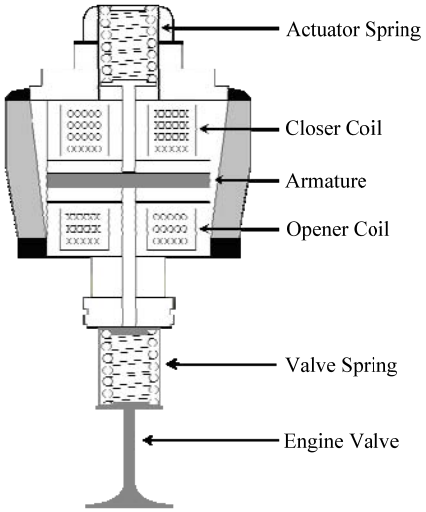


图 1-1　最早的电磁气门结构示意图

目前，对于电磁气门的模型研究的比较深入的主要有两种设计方案。第一种设计方案包含两组电磁线圈和两组预压缩弹簧，其结构示意图如图 1-2 所示。这种结构设计一般具有两组电磁线圈，两组弹簧和一个与气门相连的可运动衔铁。电磁线圈被缠绕在铁磁材料上，并串接在由 PWM 电压斩波控制的电力电子电路中。通常，气门工作在弹簧的固有振荡频率附近。当两边线圈都不通入电流，衔铁将静止在运动行程的中间位置。一旦某个线圈被加上电压，衔铁将开始运动。由线圈内电流产生的电磁力将克服弹簧力和摩擦力做功。为加快响应速度、减少线圈电能消耗，两组弹簧被预先压缩。当气门需要启动时，通过初始化程序将衔铁吸引至一端，并通入保持电流使得衔铁保持静止。当气门需要打开时，关闭线

圈输入电源，线圈放电，电磁力减小，衔铁在弹簧力的作用下迅速向另一端运动。同时，开启线圈接通输入电源，输入电流增大，电磁力吸引衔铁，克服摩擦力，最后衔铁将停留在开启状态。重复以上步骤，通过给开启、关闭线圈通入电流或释放电流可以实现电磁气门的独立控制。

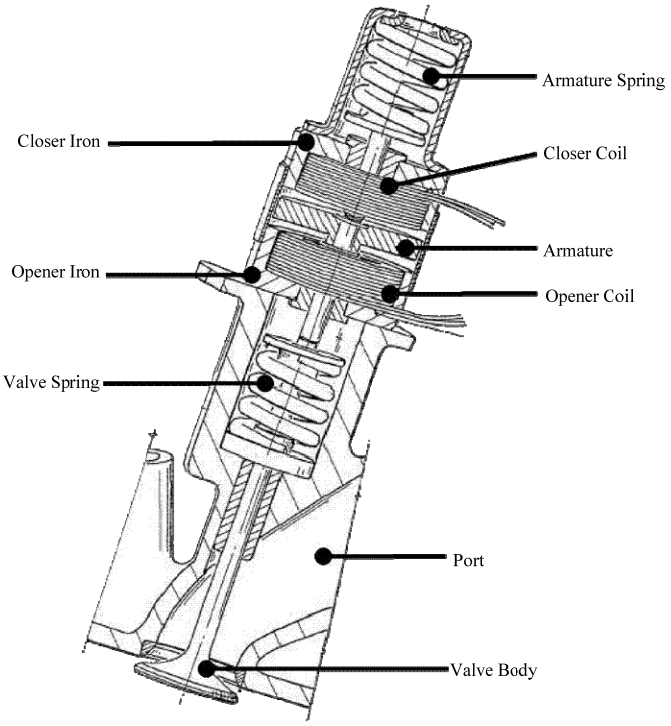


图 1-2　双弹簧式电磁气门结构示意图

另一种电磁气门结构设计方案称为 Hinged 式电磁气门，结构示意图如图 1-3 所示。

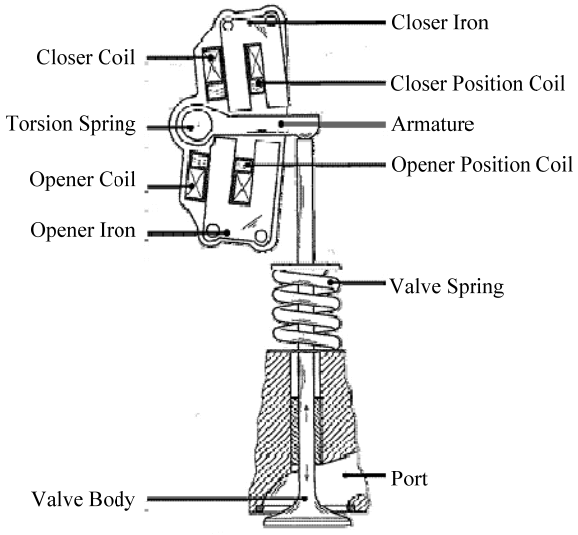


图 1-3　Hinged 式电磁气门结构示意图

这种结构设计同样具有两组电磁线圈缠绕在铁磁材料上，铁磁材料提供磁场通路。该气门开启和关闭是通过释放一侧线圈的保持电流并向另一侧线圈通入电流，产生电磁吸引力，吸引衔铁运动，衔铁再推动气门杆实现气门的开启和关闭。与气门杆连接的弹簧提供部分回复力，加快暂态过程，并可以减小落座速度。这种设计中，当气门保持开启和关闭时，需要向相应线圈通入保持电流，以保持衔铁和气门的位置。

以上两种电磁气门的结构设计各具特点，同时也面临所有电磁气门都遭遇的三个挑战：第一，为了保证内燃机高速运行下的可靠进气排气，电磁气门必须具有很快的响应速度，过渡时间应尽可能缩短；第二，当气隙很小时，电磁力会突然增大，这会导致气门落座冲击较大，产生机械噪音，增大气门磨损；第三，施加在电磁线圈上的电流会消耗一定电能，增大了内燃机的总损耗，降低系统的效率[12-13]。

1.2.2 电磁气门驱动装置的特点

在配备有新型电磁驱动装置的汽车内燃机上，气门的开启或者关闭，是由数字信号微处理器控制驱动装置来实现的。CAN 总线可以提供汽车运行状态下的转速快慢、功率大小、温度变化等的关键参数，数字信号微处理器通过将 CAN 总线传来的信号进行分析处理后，来确定给线圈所施加电流的大小和方向，气门开启、关闭的响应速度则由电流的大小、方向来决定。电磁气门和有凸轮连杆结构的机械气门相比，有着如下几个独特的优势。

（1）传统的内燃机使用机械凸轮轴内燃机气门系统，气门进排气时间是只能由凸轮的形状和相位角确定，而不能根据燃料的经济性、排放、最大扭矩等方面来选择最佳时机，这导致内燃机在其他速度范围内扭矩输出小、燃油效率低、尾气排放大[16]。电磁驱动气门机构恰是一种技术解决方案，它克服了传统的凸轮轴内燃机气门系统的缺点。气门由电磁机构进行驱动，可独立控制。在部分负荷工况下，也可有选择地将某些气缸关闭，降低油耗[14-15]。据研究，燃料消耗可减少高达 15%，扭矩输出提高了内燃机转速范围的宽度，可减少二氧化碳的排放量高达 15%[16-17]。

（2）传统的内燃机气门的开启和关闭，是由凸轮轴、连杆机构、减速齿轮等一系列复杂的机械装置配合完成的，虽然可靠性较好，但是摩擦损耗、泵气损失较大，效率不高，如何取代传统内燃机中的凸轮连杆机构，成为各位专家、学者研究的一个趋势。应运而生的电磁气门，大大简化了内燃机的结构，减少了生产、制造成本，因此也避免了传统内燃机运行过程中机械传动机构中摩擦损耗的出现，使得燃烧效率得到提高[18-19]。

（3）传统的内燃机驱动气门，是靠机械传动装置牵引完成的，这种方式的缺点是机械延时长，响应速度慢。而电磁驱动气门由于使用了固态的开关电子元器件来实现电子控制，因此系统的动态响应速度非常快[20]。

与同类型的其他气门相比，无论在结构或在工作原理上，永磁自锁型电磁气门和普通的电磁气门相比都有所不同，它有着诸多显而易见的优点。永磁自锁型电磁气门凭借体积小、断电保持自锁的高效节能优势，赢得越来越多的关注：

（1）结构上，普通的电磁气门大多是正方体型，而永磁自锁型电磁气门呈现圆筒型，这样体积更小，节省了空间，同时也减轻了重量。对于汽车来说，这是非常有意义的。

（2）工作原理上，在气门开启或者关闭的过程中，普通的电磁气门只能依靠通电线圈产生的电磁力来吸合衔铁。由于在衔铁和内外铁心间的工作气隙较大时，电磁力特别小，为了使衔铁运动起来，必须给线圈施加大电流，这就会产生很大的铜耗，线圈发热严重。而永磁自锁型电磁气门则可以轻松解决该问题，永磁体和动子铁心是一个整体，可以提供径向磁场，径向磁场切割通电线圈，使得动子能受到一个额外轴向的安培力，起动更简单，运动更迅速。最后，在动子到达一端止点时，永磁体可提供足够大的吸合电磁力使气门保持住，线圈不必再持续通电，大大减少了电能损耗。

电磁气门驱动装置结构简单，控制方便，是比较容易实现的无凸轮轴气门驱动方式[21-22]。但是，由于在工作气隙较小时，电磁力随气隙变化特别敏感，这就导致气门气门落座时与落座圈之间碰撞严重，噪声很大，加大了气门的磨损，缩短了装置的使用寿命。电磁力随气隙变化敏感，这是电磁驱动系统的固有特点，也是控制过程中的一个难点，表现在：气门从全开到全闭（或全闭到全开）的单行程时间不能超过 4ms，而整个系统又是高度非线性，时间常数为毫秒级，故控制气门着陆的响应时间只能是零点几毫秒[23-24]。在电磁驱动装置的工作气隙较小时，电磁力随气隙和电流的变化都非常敏感，且随着工作气隙的变小，系统的电感迅速增大，时间常数也随之提高，电流的变化率降低，因此若要实现快速控制将变得非常的困难。

为了满足内燃机机最高转速下的工作要求，电磁气门驱动装置必须具有足够高的往返运动频率[25]。气门-弹簧系统的固有振荡频率决定着内燃机最高循环周期。由于气门由开启到闭合，或者由闭合到开启时，弹簧-气门运动系统基本处于简谐振荡状态，每次动作的时间基本上就是运动系统固有振荡周期的二分之一。因此，气门运动周期是由内燃机的往复周期决定，是已知的，故动子质量一旦确定，弹簧刚度系数也就确定了。弹簧的最大压缩长度即气门的行程也由内燃机的要求确定，也是已知的。弹簧刚度系数确定后，电磁驱动装置的自锁保持力

也就确定了。同时，气门的落座速度也可以根据电磁力、弹簧力等的关系，推算出来了。由此可见，电磁气门驱动装置是一个系统的、复杂的机构，机构中各个部分都是相互影响、相互制约的，在响应时间、落座速度不可得兼的情况下，只能通过设计合理的系统结构、驱动电路以及选择合适的磁性材料来折衷解决。

1.3 电磁气门驱动装置相关研究

目前，国内外针对电磁气门驱动装置的研究主要是建立在双弹簧、双电磁铁结构的基础之上。这种类型的电磁阀是当前学术界主要研究的气门驱动结构，它在具备了快速响应性能的同时，又在系统整体可靠性和节能减排等方面有着卓越的表现。因此，在结合现有装置结构优点的同时，充分运用科学技术，研究出新型具有高可靠性、高效的电磁气门驱动装置成为当前该研究领域内所研究的重点。电磁气门驱动装置也凭借如此诸多的优势，吸引着众多国内外知名学者、科研人员等研发团队纷纷投身该领域开展研究。

1.3.1 国内发展状况

国内，大连工学院的张育华是最早进行探索性研究的学者之一[26]。80 年代末，作者提出了一种采用大功率高性能螺管式电磁铁通过传动架直接驱动气门的方案，该模型属于早期单弹簧、单线圈的电磁气门驱动装置。为研究电磁气门机构的内在规律，作者从理论上分析了此电磁驱动机构的工作原理，并在单缸柴油机上进行了实验，对控制策略也提出了独特的看法。当气门的额定升程一定时，若要使气门上升地快，最有效的手段是加大“强激”电流，即向电磁线圈通入较额定电流大若干倍的瞬态脉冲电流，以使得电磁气门获得良好的加速性能；若欲寻求电磁气门所能跟随的内燃机最高转速，则在提高“强激”电流的同时还需要找出最佳的通电持续时间值；当气门升程的额定值发生变化时，则需同时对“强激”电流和通电持续时间进行调整，使之取值合理。归纳起来，大体思路是采用微电脑对配气过程优化实时控制，通过适时地改变螺管线圈通电的时刻、通电电流的大小及通电持续时间实现对预期目标控制的目的。

近几年，清华大学、浙江大学、南京理工大学等高校也陆续开展了与电磁气门驱动技术相关的科研项目，基本是在国外双弹簧、双线圈结构的基础上进行理论分析，针对落座问题提出了不同的控制算法，然后进行验证性试验。清华大学赵雨东教授等对电磁气门进行了多年的系统性研究，在气门的落座、响应速度以及装置结构的合理性等方面展开分析，从静态实验性能和动态实验性能上分别对装置进行过详细的讨论，得出了一些对电磁气门驱动装置的特性有重要参考价值

的数据，取得了很好的阶段性研究成果[27-31]。

浙江大学的严兆大教授及其博士生王希珍、李莉等，根据电磁全可变气门机构的实际情况，与一汽集团无锡油泵油嘴研究所合作开展了电磁驱动气门机构的项目课题，采用模型分析、仿真计算与试验测试相结合的研究模式，对电磁气门驱动系统进行了较为系统和深入的研究，揭示了电磁气门工作机理，并分析了各种工作参数对其工作响应过程的影响，研究已经得了一些很有价值的成果，对电磁气门驱动技术的发展具有很好的指导意义[32]。

南京理工大学的常思勤教授及其研究生李路路，建立了针对自由活塞式内燃机的电磁驱动气门模型，通过对模型进行有限元仿真分析，计算出气门所能承受的最大载荷以及在不同落座速度下气门与落座圈之间的撞击力，为控制策略的研究做出了铺垫。另外，作者还分析了温度场对电磁气门工作的影响，研究了不同工况下驱动装置中的温度分布情况。值得关注的是，作者设计了一种磁驱动气门落座冲击缓冲结构，并通过理论分析证明了缓冲结构吸收冲击能量、降低冲击力的有效性[33]。这中方案从机械结构设计上达到有效实现冲击缓冲的目的，降低了控制策略的要求，减少了电控的设计成本，对于电磁气门软着陆技术的实现有着重要的参考价值。

这几所高校研究的气门结构基本相同，但他们对电磁气门提出了各自不同的设计方法和控制策略，并对其工作特性进行了分析，为以后研发高性能 EMVA 奠定了坚定的基础。然而，目前关于电磁气门的研究还没有形成一个成熟的体系，制作技术较为粗糙，控制模型也相对简单，没有达到商业化生产的水平，装置结构、控制策略等方面都尚待完善。

1.3.2 国外发展状况

上个世纪七十年代，美国的 Longstaff Kenneth 和 Holemess Stanley 提出了双弹簧、双线圈的电磁气门驱动结构。此后，国外对电磁气门驱动装置的结构及其相关的控制系统技术的研究从来就没有停止，在这其中，尤其以美国的 Aura Systems 公司、GM 公司以及德国的 FEV 公司为代表的研究机构都对其进行了卓有成效的研究，取得了丰硕成果[34-35]。相关的研究内容可概括为以下几个方面：

（1）电磁气门结构、布局的合理性；

（2）电磁气门响应的快速、稳定性；

（3）电磁气门软着陆的研究。

随着科学技术水平的发展以及制造工艺的进步，使得之前许多想法的实现成为可能。美国的 Aura Systems 公司、GM 公司以及德国的 FEV 公司分别对自己的产品做了大量的试验研究。

Aura Sysetms 公司的 EMVA 结构特点是静铁芯外形呈空心圆柱状，衔铁呈圆盘状，静铁芯内部空心处放置双弹簧，衔铁的上、下两侧各放置一个。该公司的 EMVA 装置在转速为 10000r/min 的每缸四气门汽油机上演示过，当初始化线圈电流为 15-25A 时，试验采集到的气门过渡时间为 2.42-3.0ms，气门落座速度为 0.1m/s，气门在关闭或最大升程位置时保持电流为 1.5-1.4A。

GM 公司的 EMVA 结构特点是电磁驱动装置中添设了可以起到自锁功能的两套永磁体，且永磁体是固定不动的。永磁体、线圈都位于两个电磁铁内部的中间部位，永磁体主要提供衔铁在全开或者全闭时候的锁紧电磁力，衔铁上、下直线运动时候的电磁力主要靠通电线圈产生。该公司的 EMVA 装置在转速为 1500r/min 的单缸二气门汽油机上演示过，开环控制下，试验采集到的气门过渡时间最快为 7.3ms，气门落座速度最低为 0.35m/s，气门升程为 8mm，全开或全闭状态下只需靠永磁体提供锁紧力而无需给线圈通入电流。

FEV 公司的 EMVA 结构特点是静铁芯和衔铁外型形都呈长方体，由于两个弹簧分别放置在气门上、下静铁心的上底端和下底端，故驱动装置整体呈现出较为细长的结构。该公司的 EMVA 装置能使汽油机在 6500r/min 的转速下工作，过渡时间为 3ms 左右，气门落座速度为 0.1m/s 左右。

这三个公司提供方案的相同点在于三者都采用双弹簧、双线圈的结构，利用弹簧-质量系统的原理实现气门的开启或者关闭。这三种方案又都各具特色，结构合理，性能优良，每一种都可看作电磁气门驱动结构设计的典范。另外，德国的西门子公司、宝马公司以及德国的雷诺汽车公司等都对电磁气门驱动装置进行了研究[]。最后的研究结果发现，在每个内燃机循环中，每个气门开启或者关闭的电能消耗大约为 1J，而这个能量消耗的多少，取决于气门的大小、内燃机效率等设计参数，且气门运动的周期、启闭保持时间、落座速度、响应快慢等参数等也都可以根据内燃机的转速和负荷自由进行设计。

1.4 论文的主要研究工作

实际上，目前国内外有关电磁气门驱动系统方面的研究还大都处在起步阶段，各种设计、控制思想都还处于探索过程中，有待进一步成熟，对于其中有些问题的认识也有待于进一步深化。根据当前的实际情况，本文的研究对电磁气门驱动系统所涉及的理论和技术开展了较为全面的论述，重点针对永磁自锁型电磁气门的结构、性能进行了深入的研究，全文的主要研究工作如下。

首先，在参阅大量国内外论文基础之上，对电磁气门驱动系统的技术发展现状进行了阐述，以典型的双弹簧、双线圈结构模型为基础，详细地论述了电磁气

门的工作原理，电磁气门驱动技术可在汽车的节能、减排方面发挥的重要作用。

其次，提出了一种全新的永磁自锁型电磁气门驱动结构，该装置与以往典型的双弹簧、双线圈电磁气门相比，无论从结构上还是从特性上都有很大的不同。永磁自锁型电磁气门驱动装置将永磁体引入，使得气门在全开或者全闭的时候线圈不必通电，从而达到了节能的效果，使气门性能更高、实用性更强。

然后，建立了永磁自锁型电磁气门驱动装置的动态模型，通过电磁场有限元分析、计算电磁力、电感等各个重要参数，来对该方案的可行性进行评估，并进一步对其工作机理进行深入研究，结合内燃机实际情况，将方案进行反复推敲、不断优化，最终确定模型的各个参数。

最后，搭建控制电路模型，将试验所得到的电磁力和感应反电动势等数据代入控制模型进行分析，得出气门的运动曲线，进而得到气门的落座速度，经过比较和对照普通电磁气门的落座状况，验证了本文所提出模型的可行性。

第二章 永磁自锁型电磁气门驱动装置综述

2.1 引言

内燃机工作过程中，气门通过不断的开启、关闭，来实现内燃机的进气、排气，为内燃机提供必须的燃料，保障燃料充分燃烧做功和清空废气[36]。气门在这一系列循环工作过程中，开启保持和闭合保持的时间甚至可能比运动过程的时间更长。普通的电磁气门驱动装置由于是依靠线圈电流产生的电磁吸力平衡弹簧弹力来使气门保持在某一状态，不但不节能，而且容易使线圈发热，影响电磁气门的性能。鉴于此，在电磁气门驱动装置中引入永磁体则显得意义重大。它不但可以解决线圈不通电下使气门保持在开启或者关闭状态下的问题，还可以避免线圈持续通电造成的能耗以及发热[37-38]。

一个永磁自锁型电磁气门驱动装置在内燃机中的布置如图 2-1 所示，通过控制电磁气门驱动装置控制气门的启闭，实现进气或排气。

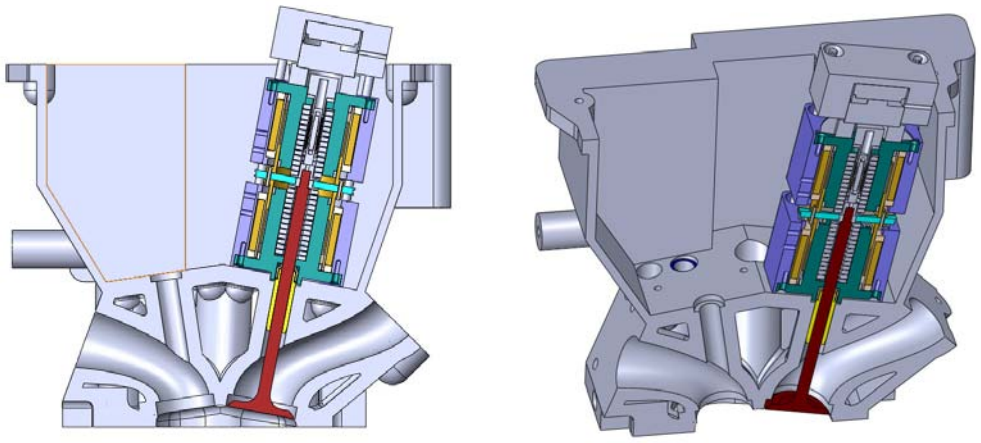


图 2-1　一个永磁自锁型电磁气门驱动装置在内燃机中的布置

2.2 永磁自锁型电磁气门驱动装置简介

永磁自锁型电磁气门驱动装置的结构如图 2-2 所示。它呈圆筒形，整体轴对称，它包括气门、预压缩双弹簧和上下基本对称的两套电磁驱动机构，每套电磁驱动机构可分为动子和定子两部分。动子包括圆盘形衔铁、固定在衔铁上的动子支架和气门顶杆等主要部件；定子主要包括内铁心、外铁心、铜铁交叠螺旋状线

圈和线圈架等主要部件。

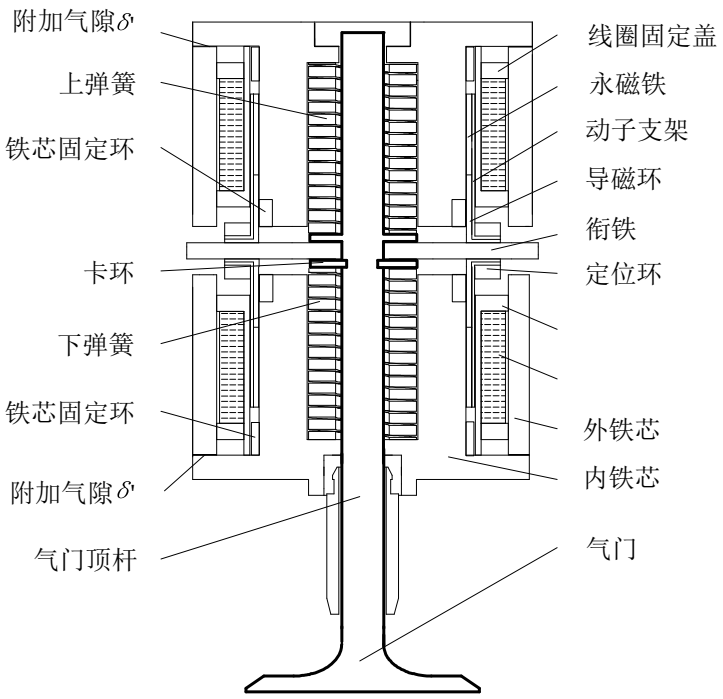


图 2-2　永磁自锁型电磁气门驱动装置结构示意图

由图 2-2 可见，气门顶杆、弹簧等皆为同心安装，由里向外依次为气门顶杆、弹簧、内铁心、永磁体及导磁环、动子支架、线圈架、线圈、外铁心。

动子支架内侧粘贴着径向充磁的永磁体，并在永磁体与衔铁之间区域粘贴由软磁复合材料制成的导磁环，如图 2-3 所示。导磁环的作用是动子运动过程时为永磁磁场提供部分磁路，以达到提高直线电机性能的目的。动子支架通过定位环固定在衔铁骨架上。

(a) 俯视　　(b) 侧视

图 2-3　装配好永磁体的支架

内、外铁心均是由轴线方向看去径向呈扇形的特制硅钢片拼制、叠压而成的

两个圆筒，硅钢片间相互绝缘。内铁心实物图如图 2-4 所示，外铁心实物图如图 2-5 所示。

(a) 俯视　　(b) 侧视

图 2-4　内铁心实物图

(a) 俯视　　(b) 侧视

图 2-5　外铁心实物图

衔铁整体呈圆盘状，实物图如图 2-6 所示，将由轴线方向看去径向呈扇形的特制硅钢片拼制、叠压后填充于衔铁骨架间，硅钢片叠压方法同铁心类似。圆盘状衔铁通过卡环固定在气门顶杆上，构成一完整动子。

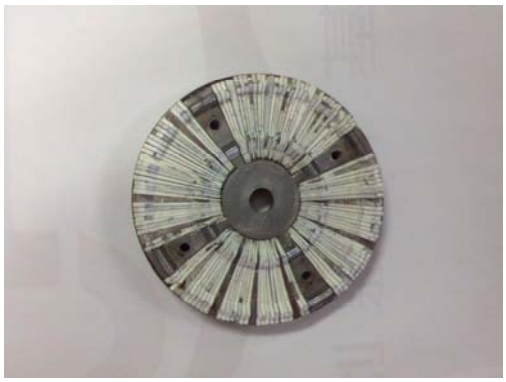


图 2-6　衔铁示意图

铜铁交叠螺旋状线圈是电磁机构的核心部件，其制做方法为：将特制的宽为4mm、平均厚度为 0.2mm 两侧稍微不等厚的直漆包铜带和直软铁带上下叠放在一起，如图 2-7(a)所示。然后，通过特制的拉伸设备盘绕在线圈支架上，铜线圈圆周方向导电，铁线圈径向导磁，最后可将这一完整的切向导电、径向导磁的电磁线圈直接嵌入外铁心中，，如图 2-7(b)所示。

(a)线圈展开图　　(b)线圈装配图

图 2-7　铜铁交叠螺旋状线圈示意图

当闭合回路内部的磁链发生变化时，回路内会感应出反电动势，若该回路为导电通路，则会产生感应电流，阻碍原磁链的变化，发生电磁阻尼现象，同时产生阻尼损耗。为了避免电磁阻尼现象的发生，动子支架、线圈支架、铁心固定环和定位环等可构成环形回路的部件均需采用只导磁不导电的软磁复合材料或其它特殊材料。

图 2-8 为电磁气门驱动装置的总装图。可以看出，该装置分为上、下对置的两部分，这两部分为几乎完全对称的结构。

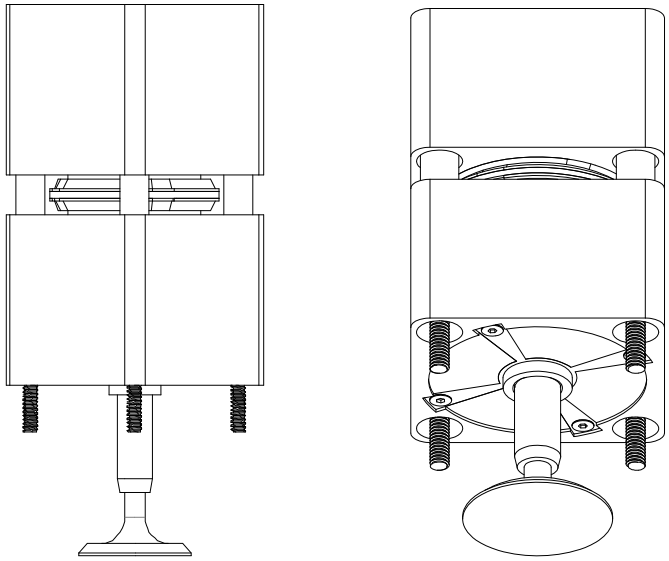


图 2-8　永磁自锁型电磁气门驱动装置总装图

2.3 永磁自锁型电磁气门驱动装置的结构设计

2.3.1 弹簧的选择

弹簧是电磁气门驱动装置中最重要的部件之一，弹簧的选择直接决定了气门的运动周期大小，并且影响着机构的工作性能好坏。设计电磁气门驱动装置的首要出发点，就是要正确的选择弹簧。

单弹簧、单磁铁结构电磁气门的缺点是响应速度比较慢，不能满足汽车高速运转的工况，所以目前已经很少有人再研究单气门的结构了。双弹簧的电磁气门驱动装置目前是研究的热点。如图 2-9 所示，双弹簧的电磁气门驱动装置中，两个弹簧上、下对置，相当于两个弹簧并联，系统固有震荡周期减小为原来的$1/\sqrt{2}$，这样，既提高了气门的响应速度，又使得气门运动控制起来更加灵活。目前，这种双弹簧、双线圈的电磁气门驱动机构逐渐得到了大多数人的认可。

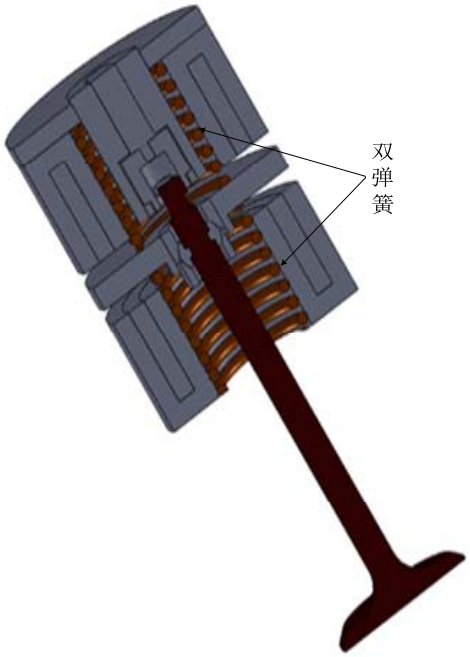


图 2-9　双弹簧的永磁自锁型电磁气门驱动装置

气门往返运动频率取决于内燃机最佳循环周期。气门由开启到闭合，或者由闭合到开启时，弹簧-气门运动系统基本处于简谐振荡状态，每次动作的时间基本上就是运动系统固有振荡周期的二分之一[39]。两个刚度系数皆为 k 的弹簧并联，其固有振荡周期为

$$T = 2\pi\sqrt{m/(2k)} \qquad (2\text{-}1)$$

式中，T——弹簧-气门运动系统固有振荡周期，单位 s；

m——动子的质量，单位 kg；

k——弹簧的刚度系数，单位 N/m。

实际上，气门运动周期和弹簧的最大压缩长度即气门的行程由内燃机决定，是已知的[40]。故动子质量一旦确定，弹簧刚度系数也就确定了，电磁驱动装置的自锁保持力也就确定了。

2.3.2 静子铁心的尺寸的确定

内、外硅钢片铁心为永磁体和通电线圈所产生的磁场提供磁路。内外铁心的径向厚度确定时，遵循磁路截面基本相等原则[41]。本设计，内铁心内径 20mm、外径 34mm，外铁心内径 48mm、外径 56mm，衔铁厚 4mm。

2.3.3 永磁体的选取

永磁体的作用，一是在衔铁吸合时在衔铁与内外铁心间形成较强的永磁磁场，产生电磁吸力，实现自锁；二是在动子做直线运动时，在铜铁交叠螺旋状线圈处产生较强的径向永磁磁场，线圈通电时产生较大的轴向电动力。

图 2-10 给出了线圈不通电永磁体取不同轴向长度时动子所受电磁力随位移变化曲线。若永磁体轴向长度 *l* 过短，如 *l*=12mm、*l*=16mm 时，在吸合位置附近自锁电磁力较小。若永磁体轴向长度过长，如 *l*=24mm、*l*=28mm 时，自锁电磁力过大，导致气门落座时冲击很大，气门易磨损；同时电磁力在工作气隙较大时产生波动，不利于控制。而当永磁体长度 *l*=20mm 时，气门的自锁力足够大，可满足系统的性能要求。

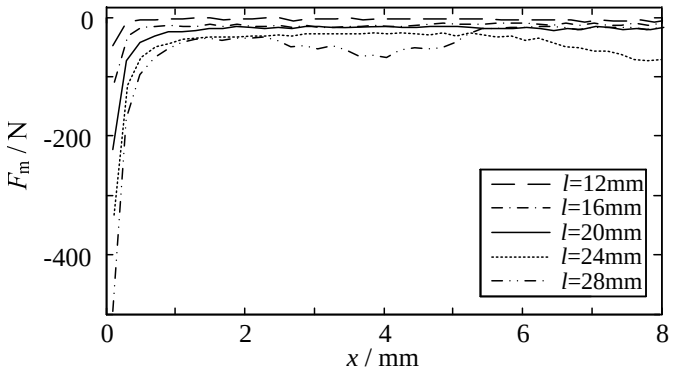


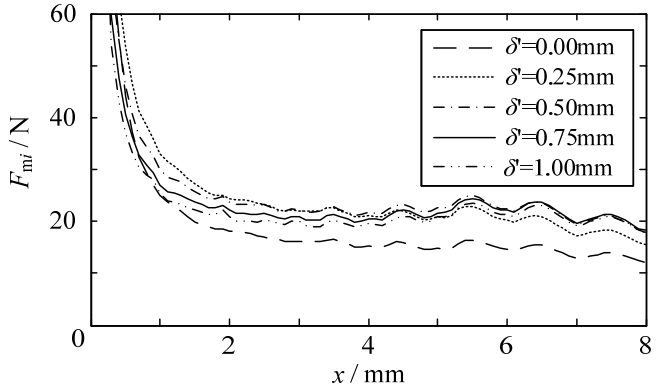
图 2-10　线圈不通电、永磁体取不同轴向长度时的电磁力

2.3.4 附加气隙δ'的确定

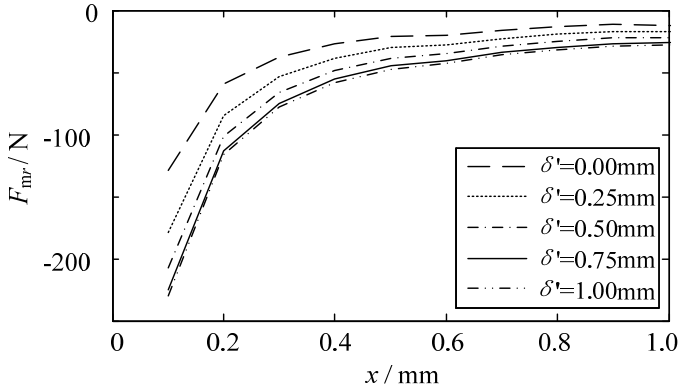
圆筒形电磁铁的内铁心和底座是一整体，在外铁心和内铁心底座之间填充工

程塑料，相当于设置一附加气隙δ'。其目的是调整电磁驱动装置在不同工况下各处的磁场，既要保障衔铁吸合后有较大的自锁电磁吸力，还要确保动子运动时直线电机部分有足够的轴向电动力。

电磁驱动机构取不同附加磁气隙δ'时的电磁力分析结果如图 2-11 所示。由图 2-11(a)可见，δ'过大，会削弱直线电机部分的轴向电动力，表现为在相同工作电流 i 下 F_{mi} 随 δ' 增加而减小；由图 2-11(b)可见，δ'过小，会使自锁电磁吸力不足，主要表现为在吸合位置附近电磁吸力 F_{mr} 随 δ' 减小而减小。图 2-11 表明，改变附加磁气隙δ'时，轴向电动力 F_{mi} 不能与衔铁与内外铁心间的电磁吸力 F_{mr} 同时增减。综合考虑，最终选择附加磁气隙δ'为 0.75mm。



(a)去磁电流 i=-5A 时轴向电动力 F_{mi}



(b) i=0 时电磁吸力 F_{mr}

图 2-11　不同附加磁气隙下的电磁力

另外，外铁心内壁和线圈外侧间填充软磁复合材料，既可改善系统导磁性能，又利于线圈散热。

2.3.5 永磁自锁型电磁气门驱动装置的参数

表1给出了电磁气门驱动装置中动子总质量、弹簧刚度系数、线圈等主要结构的相关参数。

表 1 电磁气门驱动装置的规格

技术参数	数值
动子总质量 m	230g
弹簧刚度 k	70kN/m
铜线圈电阻 R	0.2Ω
铜线圈电感 L	5mH
线圈额定电压 U	42V
衔铁（气门）最大运动行程 x	8mm

2.4 永磁自锁型电磁气门的工作原理

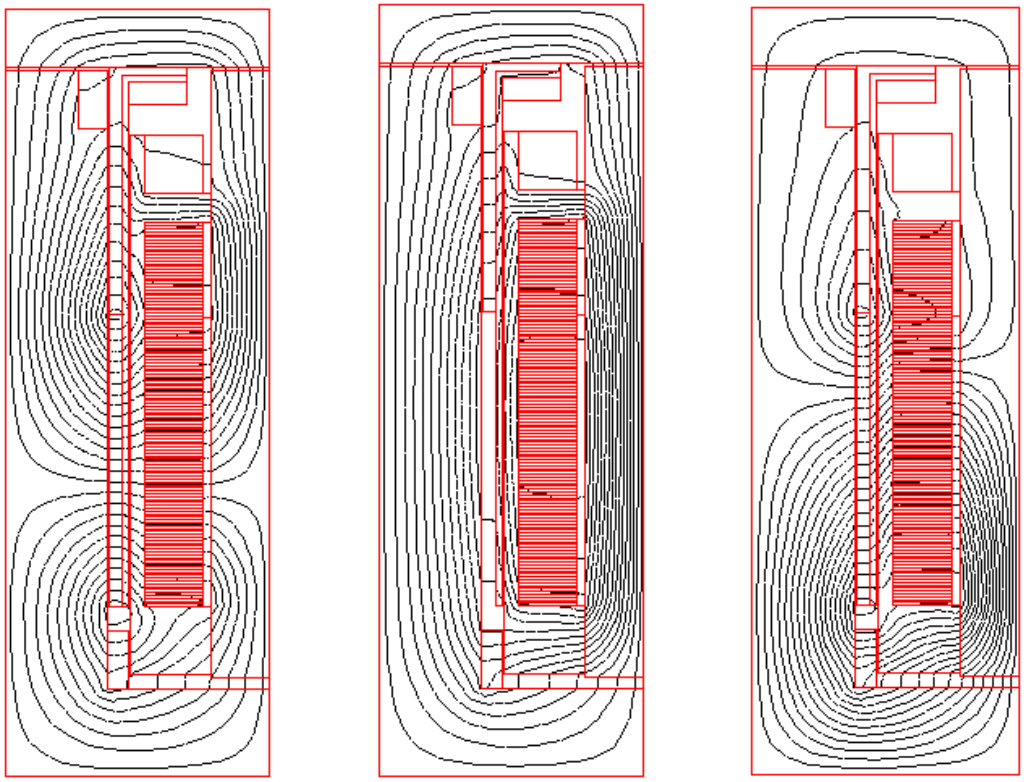
与普通双线圈、双弹簧电磁气门的工作原理类似，但是由于配置了永磁体而能自锁。气门总升程 8mm。

以一个行程为例，其工作原理如下：假设开始时气门完全开启，衔铁位于下止点，位于下方的那一套电磁驱动机构的衔铁与内外铁心间永磁电磁力大于弹簧力，处于自锁保持状态。线圈通入起去磁作用的电流，衔铁与内外铁心间永磁气隙磁通被削弱，电磁力一旦小于弹簧力，衔铁就得以释放，在弹簧力作用下动子开始加速向上运动，此后动子处于近似的简谐振动状态。同时，通电线圈与永磁体间构成的圆筒式永磁直流直线电机也形成向上的电磁力，为运动系统补充能量，克服运动中形成的各种损耗。衔铁越过中间位置后，弹簧力方向改变，衔铁减速，控制去磁电流大小，衔铁最后以低于 0.1m/s 的速度落座于上止点，气门完全闭合；同时位于上方的那一套电磁驱动机构实现了自锁，并保持至控制气门开启之时。

电磁装置整体结构轴对称，用二维模型就能够反映三维情况。由于上下两部分结构基本对称，故可取图 2-2 所示装置下半部分的右截面作为分析对象，采用二维轴对称模型进行分析，所得电磁气门驱动机构自锁与解除自锁时磁场分布如图 2-12 所示。

图 2-12(a)为线圈未通电仅由永磁体产生的磁场分布图，衔铁与内外铁心工作气隙间磁场较强，电磁力大于弹簧力，处于自锁状态。为了理解解除自锁状态时线圈去磁电流对工作气隙间磁场的影响，将永磁体按空气处理，得到线圈去磁电流单独作用时产生的磁场分布图如图 2-12(b)所示，实际中这种情况是不存在的。线圈去磁电流单独作用与永磁体单独作用在工作气隙间产生的磁力线方向相反。图 2-12(c)为永磁体和线圈去磁电流共同作用下的磁场分布，工作气隙间磁场很弱，电磁力小于弹簧力，EMVA 即将解除自锁；也可以看出，此时永磁磁场

与线圈电流产生的磁场是正交的，永磁直流直线电机动子永磁体受到一个方向向上的电动力，此后 EMVA 将成为一台圆筒形直流永磁直线电机。



(a) 仅永磁体作用　　(b) 仅去磁电流作用　　(c) 两者共同作用

图 2-12　电磁气门驱动机构自锁与解锁时的磁场分布

2.5 本章小结

在本章内容中，主要介绍了永磁自锁型电磁气门驱动装置的工作原理，以及结构设计的原则、材料选择的依据等。

首先，介绍了永磁自锁型电磁气门驱动装置的结构。它呈圆筒形，整体轴对称，包括气门、预压缩双弹簧和上下基本对称的两套电磁驱动机构，每套电磁驱动机构可分为动子和定子两部分。动子包括圆盘形衔铁、固定在衔铁上的动子支架、粘贴在动子支架上径向充磁的永磁体和气门顶杆等主要部件；定子主要包括内铁心、外铁心、铜铁交叠螺旋状线圈和线圈架等主要部件。

然后，以一个行程为例，介绍了永磁自锁型电磁气门驱动装置的工作原理。开始时，电磁力大于弹簧弹力，气门保持在开启（关闭）状态下。给线圈通反向去磁电电流，衔铁气隙处永磁磁场被削弱，衔铁所受到的电磁力变小，气门受力不再平衡，弹簧弹力一旦大于电磁力，则完成解锁，在弹簧弹力作用下动子开始运动。运动过程中，动子受到弹簧弹力、直线电机部分的电动力、摩擦力等，并

在这些力的作用下衔铁先加速穿过中间位置，后减速直至气门完全关闭（开启）位置。线圈断电，永磁体提供的磁力和弹簧弹力保持平衡，气门自锁保持在关闭（开启）状态下，并保持至控制气门开启之时。整个运动类似一个弹簧-质量简谐振动过程，且理想情况下运动周期符合简谐运动规律。

最后，着重介绍了各个重要参数的选取原则以及材料确定的依据。

（1）气门往返频率取决于内燃机最佳循环周期，气门由开启到闭合或者由闭合到开启时，弹簧-气门运动系统基本处于简谐振荡状态，每次动作的时间基本上就是运动系统固有振荡周期的二分之一，两个刚度系数皆为 k 的弹簧并联，其固有振荡周期为 $T=2\pi\sqrt{m/(2k)}$，它决定了内燃机最佳循环周期。

（2）内外铁心的径向厚度确定时，遵循磁路截面基本相等原则。

（3）永磁体的作用，一是在衔铁吸合时在衔铁与内外铁心间形成较强的永磁磁通，产生电磁吸力，实现自锁；二是在动子做直线运动时，在铜铁交叠螺旋状线圈处产生较强的径向永磁磁场，线圈通电时产生较大的轴向电动力。永磁体轴向长度过短，电磁气门的自锁电磁力不足，这会导致气门不能完全开启或者闭合，因而系统无法正常运行；永磁体轴向长度过长，电磁气门的自锁电磁力会很大，这会导致气门落座时产生很强的撞击，气门易磨损，同时电磁力在工作气隙较大时产生波动，不利于控制。

（4）附加气隙 δ' 可以用来对电磁驱动装置在不同工况下各处的磁场进行调整，但是由于附加气隙 δ' 很小，故在磁场计算时一般只依靠它来做辅助性的修正。即便如此，由于电磁场对工作气隙大小的敏感度很高，所以附加气隙大小是否合适，将对系统性能有重要影响。

第三章 永磁自锁型电磁气门的性能分析

3.1 引言

整个永磁自锁型电磁气门可以认为是由电气、磁和机械三个相互耦合的系统组成，对于系统的分析必须考虑到电、磁、机械子系统之间的联系。图 3-1 为三个子系统相互耦合关系的简化框图。而空载反电动势、电感、电磁力又在三个子系统相互耦合关系中起着重要作用。

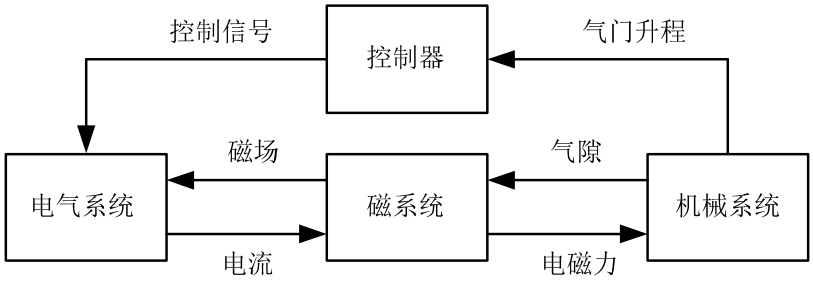


图 3-1　电磁气门系统简化框图

电气系统包括电源、控制器、双极性逆变电路和电磁线圈。线圈可等效为一个含有反电动势的阻感性负载。图 3-2 是电气系统的简化模型等效电路图。

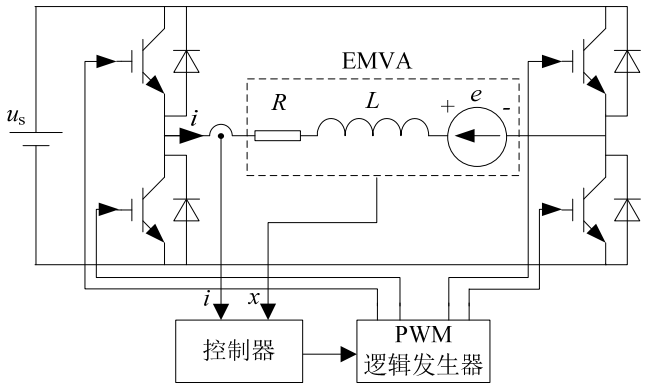


图 3-2　电气系统简化模型

磁系统是把电气系统和机械系统联系在一起的重要枢纽，如图 3-3 所示。工作气隙磁密和电系统中的感应反电动势 e 与机械子系统中的电磁力 F_m 都相关，因此对于磁系统分析计算非常的关键，可以通过有限元方分析法对电磁气门驱动装置的电磁场进行计算。

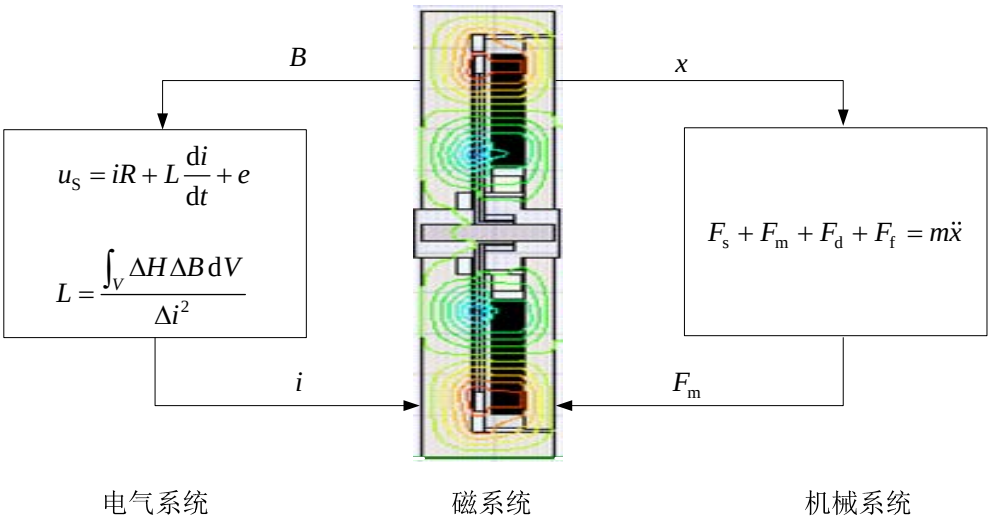


图 3-3 磁系统简化模型

机械系统是研究气门运动的重要模型。运动时，电磁气门系统在本质上是一种弹簧质量振荡系统，耦合着弹性势能和机械动能。弹簧只是储能元件，理想情况下，若不计损耗，且整个行程不通电，则气门的落座速度应刚好为零。实际上，气门动子部分在运动的时候受到的摩擦和气缸压力会产生能量损失。给线圈通电的目的也正是为系统补充这部分损失的能量，使气门能够顺利到底目标位置，并且平稳落座。线圈电流的改变对气门行程周期的影响并不大，真正决定气门响应快慢的是机械系统中弹簧的刚度系数。电磁气门中机械系统的简化模型如图 3-4 所示。

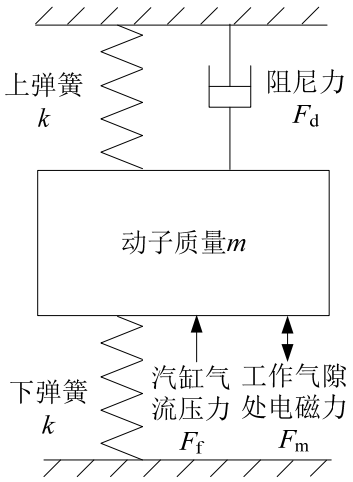


图 3-4 机械系统简化模型

驱动机构的作用是尽可能地减少因气门开关而产生的损耗，并且保障它整个运动准确、快速地执行控制指令，最后顺利、安全地落座。同时，要最大限度地减少机械磨损和噪音。因此，对控制系统的精确度要求非常高。而系统的电感、

感应反电动势、电磁力等这些参数，则正是控制系统中所必须的。下面，将分别阐述求解这几个重要参数的分析思路和各自的计算方法。

3.2 电感

电磁线圈电感 L 是驱动控制系统最为关心的重要的控制参数，它与线圈电阻一同决定了电磁气门的电磁时间常数，决定了控制算法中一些控制参数的设定，因此计算电磁线圈的电感 L 对数学模型的建立以及控制算法的设计都非常重要。但是，对于本课题研究的电磁气门，由于衔铁在不断运动，磁路磁阻不断变化，电感 L 也在运动中不断变化，并且，当衔铁靠近定子时，磁场饱和造成的电感变化也是不能忽略的。

3.2.1 一般的能量摄动法计算电感

能量摄动法多应用于电机中电感参数的计算[42]。一般是通过计算电机绕组中电流的摄动而引起电机总能量的变化，来获取电感参数。通常情况下若不计电阻，则可以把电机看作为由多个绕组构成的耦合系统，整个系统的磁场储能为

$$W=\sum_{j=1}^{n}W_j=\sum_{j=1}^{n}(\sum_{k=1}^{n}\int_0^t L_{djk}i_j\mathrm{d}i_k) \tag{3-1}$$

式中，$L_{dij}=\begin{cases}\text{绕组}i\text{和绕组}k\text{之间的互感系数} & i\neq k\text{时；}\\ \text{绕组}i\text{的自感系数} & i=k\text{时。}\end{cases}$

若要求出电机某一绕组 j 在电流大小为 i 时候的自感大小，则首先需要计算出在绕组 j 中的电流 i 经微小摄动 Δi，电流由（i-Δi）变化到（i+Δi），所引起的磁场储能变化增量

$$\overline{\Delta W}=W(i_1,i_2,\cdots,i_j+\Delta i_j,\cdots)+W(i_1,i_2,\cdots,i_j-\Delta i_j,\cdots)-2W(i_1,i_2,\cdots,i_j,\cdots) \tag{3-2}$$

然后再通过下式计算求解电感参数

$$L_{jj}=\frac{\overline{\Delta W}}{(\Delta i_j)^2} \tag{3-3}$$

通过上面的式子可以求出电机的线圈电感。通常情况下，能量摄动法求解电感时按以下步骤实施：

（1）在电机绕组中通入一个电流 i，利用有限元对其进行一次非线性分析，记录磁场储能等相关结果；

（2）只改变所需求解电感的线圈绕组中的电流，再利用有限元对其进行一

次非线性分析，分别记录下该线圈在两次电流变化后的磁场储能等参数的相关数据结果；

（3）借助前后两次计算的数据结果，根据相关公式求解得到电机线圈的电感参数。

能量摄动法避免了通过复杂的 *B-H* 曲线来计算电感的方法，计算结果精确、有效，是求解电机电感参数的新思路，为电机的设计以及结构参数的选择提供了很好的参考方案。同时，能量摄动法也为求解具有复杂结构的电磁气门驱动装置的电感参数提供了很好的思路。

3.2.2 改进的能量摄动法计算电感

电磁线圈电感 *L* 是驱动控制系统最为关心的重要的控制参数，它与线圈电阻一同决定了电磁气门的电磁时间常数，决定了控制算法中一些控制参数的设定，因此计算电磁线圈的电感 *L* 对数学模型的建立以及控制算法的设计都非常重要。但是，对于本课题研究的电磁气门，由于衔铁在不断运动，等效磁阻不断变化，电感 *L* 也在运动中不断变化，并且，当衔铁靠近定子时，磁场饱和造成的电感变化也是不能忽略的。

线圈电感可通过能量摄动法求得。根据机电能量转换原理，整个电磁驱动装置的磁场储能为

$$W_{\mathrm{m}}=\frac{1}{2}Li^{2}+W_{\mathrm{pm}} \tag{3-4}$$

式中，W_{m} ——通电线圈磁场储能，单位 J；

W_{pm}——永磁体磁场储能，单位 J。

假设 ΔW_{m}、ΔH 和 ΔB 均为线圈电流从 i 摄动到（$i+\Delta i$）时所引起的磁场储能、磁场强度和磁感应强度变化增量，则

$$\Delta W_{\mathrm{m}}=\frac{1}{2}L\left(i+\Delta i\right)^{2}-\frac{1}{2}Li^{2}=\frac{1}{2}L\Delta i^{2}+Li\Delta i \tag{3-5}$$

又因磁场储能密度 $w_{\mathrm{m}}=BH/2$，且 $B=\mu H$，故

$$\Delta W_{\mathrm{m}}=\frac{1}{2}\int_{V}\frac{1}{\mu}\Delta B^{2}\mathrm{d}V+\int_{V}(\frac{1}{\mu}B\Delta B)\mathrm{d}V \tag{3-6}$$

由式（3-5）和式（3-6）可得

$$\frac{1}{2}L\Delta i^{2}+Li\Delta i=\frac{1}{2}\int_{V}\frac{1}{\mu}\Delta B^{2}\,\mathrm{d}V+\int_{V}\frac{1}{\mu}B\Delta B\,\mathrm{d}V \tag{3-7}$$

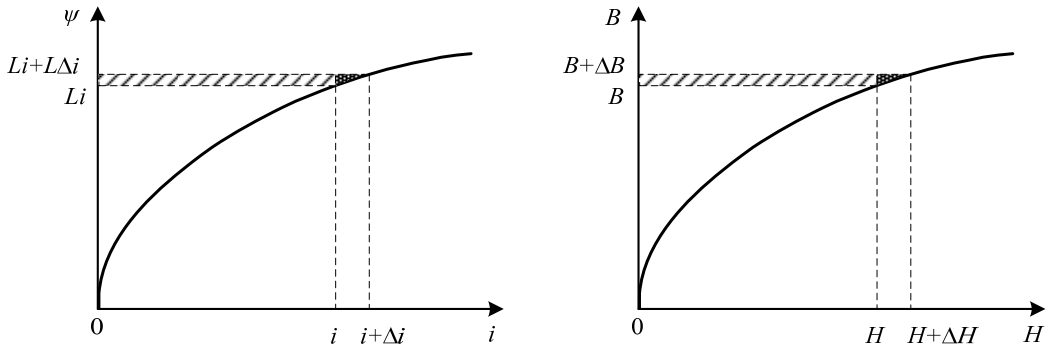
线圈电流微小变动引起的磁场储能变化如图 3-5 所示，图 3-5(a)、图 3-5(b)

中的阴影部分表示电流摄动 Δi 后的磁场储能增量。结合图 3-5 的几何关系，对比式（3-7）等号左、右两边，有

$$\begin{cases} \dfrac{1}{2}L\Delta i^2=\dfrac{1}{2}\int_V \dfrac{1}{\mu}\Delta B^2\,\mathrm{d}V \\ Li\Delta i=\int_V \dfrac{1}{\mu}B\Delta B\,\mathrm{d}V \end{cases} \tag{3-8}$$

式（3-8）的几何意义为：第一式等号左、右两边分别表示图 3-5(a)和图 3-5(b)中梯形阴影中小三角形面积；第二式等号左、右两边分别表示图 3-5(a)和图 3-5(b)中梯形阴影部分的正方形面积。求解电感时两式等价，一般采用第一式，则有

$$L=\frac{\int_V \dfrac{1}{\mu}\Delta B^2\,\mathrm{d}V}{\Delta i^2}=\frac{\int_V \Delta H\Delta B\,\mathrm{d}V}{\Delta i^2} \tag{3-9}$$



(a) $W_m=Li^2/2$　　(b) $W_m=\int_V HB/2\mathrm{d}V$

图 3-5　磁场储能增量

有限元法的基本原理是建立在能量最小化原则上，用于计算磁场能量时更为方便、准确[43]。图 3-6 为采用能量摄动法计算得出的线圈通入不同电流时电感随位移变化的曲线族。

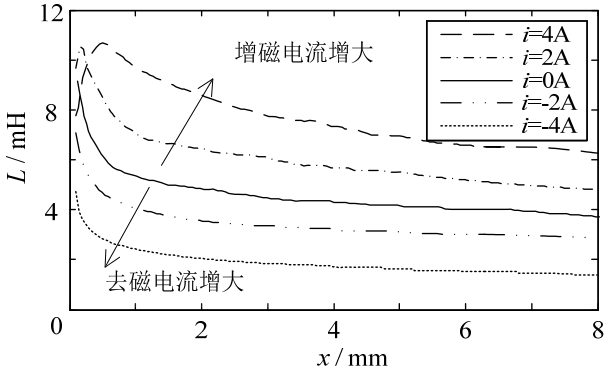


图 3-6　不同电流下电感随位移的变化

由图 3-6 可得到如下结论：

（1）位移较大时，随着位移的减小电感缓慢增加；

（2）位移小于 1mm 后，随着位移的减小电感迅速增大；

（3）当增磁电流较大时，位移减小到一定程度时，因磁路进入高度饱和状态，电感不增大反而迅速下降。

前两个结论的解释是，随着位移 x 的减小，气隙变短，线圈电感所对应的等效磁阻 R_m 减小，因此，线圈电感随 x 缓慢变大。第三个结论中，电感随位移 x 突然变化的原因是磁路饱和，这一解释可以通过仿真结果证实，小位移大电流条件下的磁场饱和现象如图 3-7 所示。

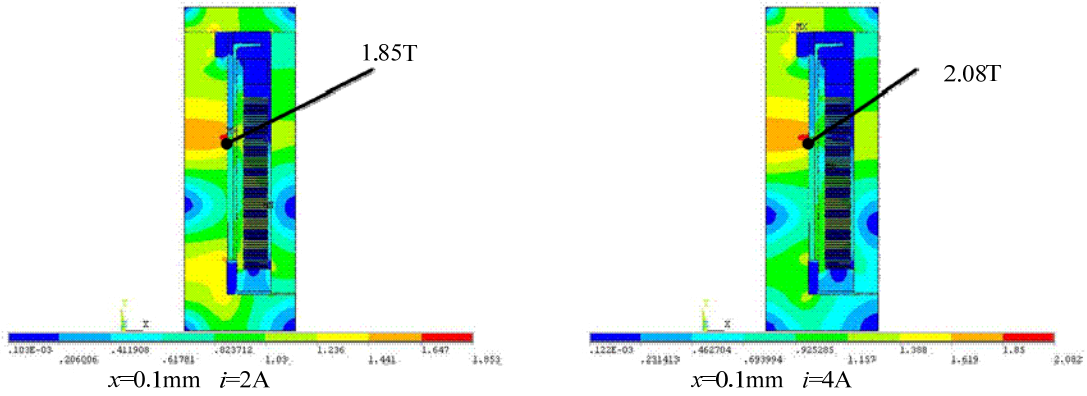


图 3-7　小气隙大电流条件下的磁场饱和现象

图 3-7 说明，当在位移较小时，线圈通入较大电流，会造成局部区域的磁场严重饱和。当磁场严重饱和后，增大电流，磁通量不会按相应比例增大，这便是磁场饱和后电感变小的原因。

3.3 空载反电动势

电磁气门驱动装置工作时中的空载反电动势同样是驱动控制系统最为关心的重要的控制参数之一。一般情况下，可以通过有限元计算法来分析解得，这中方法相对比较准确，但需要运算时间较长。另外，还有一种可以粗略估算空载反电动势的简单方法，即瞬时功率法，它可以根据某时刻输入功率来计算出该时刻的空载反电动势值。

3.3.1 有限元法计算感应反电动势

电磁气门驱动装置的电压方程式为

$$u_{\mathrm{S}} = iR + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + i\frac{\partial L}{\partial x}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} + e \tag{3-10}$$

式中，u_{s}——线圈电压，单位 V；

i ——线圈电流，单位 A；

R——线圈电阻，单位Ω；

L——线圈电感，单位 H；

x——动子位移，单位 m；

e——空载反电动势，单位 V。

电磁力 F_{m} 与衔铁的位移即衔铁与铁心之间的工作气隙 x，以及线圈电流 i 有关，而电流 i 由图 3-8 的等效电路确定。其中，u 为线圈两端所施加的电压，R 为线圈等效电阻，ψ 为线圈所交链的磁链，e 为磁链变化所产生的感应反电动势。

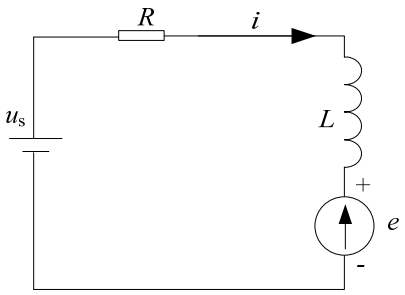


图 3-8　电磁气门等效电路图

空载反电动势 e 可通过有限元法求得，图 3-9 为动子速度 v=2m/s 时 e 随位移变化的曲线。当位移（即衔铁与内外铁心间工作气隙）较小时，永磁磁路磁阻较小，线圈交链的永磁磁链较大，e 也较大，此时的 e 是由永磁磁场随位移变化和线圈切割永磁磁场产生的。当位移变的较大后，永磁磁路磁阻和磁密变化缓慢，e 主要由线圈切割永磁磁场产生。

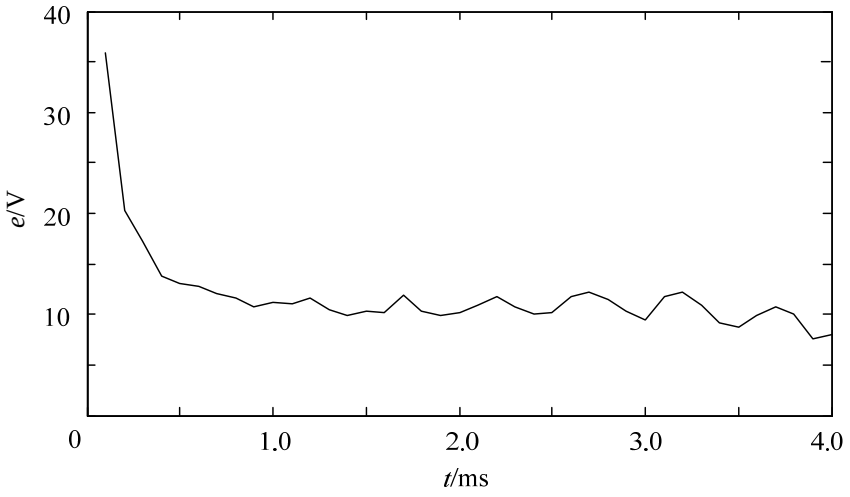


图 3-9　电磁气门驱动装置空载反电动势

3.3.2 瞬时功率法估算空载反电动势

瞬时功率法为线性化求解，所以对于非线性系统的电磁气门装置来说，计算结果的准确度并不很高，但是由于其计算步骤少，公式简单，计算结果快，对于估算感应反电动势还是比较方便。

在电磁气门的动子在运动过程中，线圈中会产生感应反电动势 e。忽略衔铁运动时电枢反应对永磁磁场的影响，则电磁力满足线性叠加原理

$$e=(F_{mi}-F_{m})v/(i\eta) \tag{3-11}$$

式中，F_{mi}——通电下衔铁所受的电磁力，单位 N；

F_{m}——未通电下衔铁所受的永磁磁场产生的电磁力，单位 N；

v——衔铁运动的速度，单位 m/s；

η——修正系数，取值 0.7~0.9 之间。实际中考虑到涡流与肌肤效应以及摩擦等因素，线圈电阻应偏大、电流应偏小，因此电流须乘以修正系数 η。

假设衔铁以 v=1m/s 匀速运动，线圈通电后，线圈的感应反电动势 e 的有限元分析结果和式（3-11）的计算结果对比示意图如图 3-10 所示。突加电压时，由于电感的存在，电流按某一时间常数增长。瞬时功率法可以避免场路耦合法通过求解复杂的积分路径来计算感应反电动势这一棘手问题，从而使控制算法得到简化，计算速度得到提升。

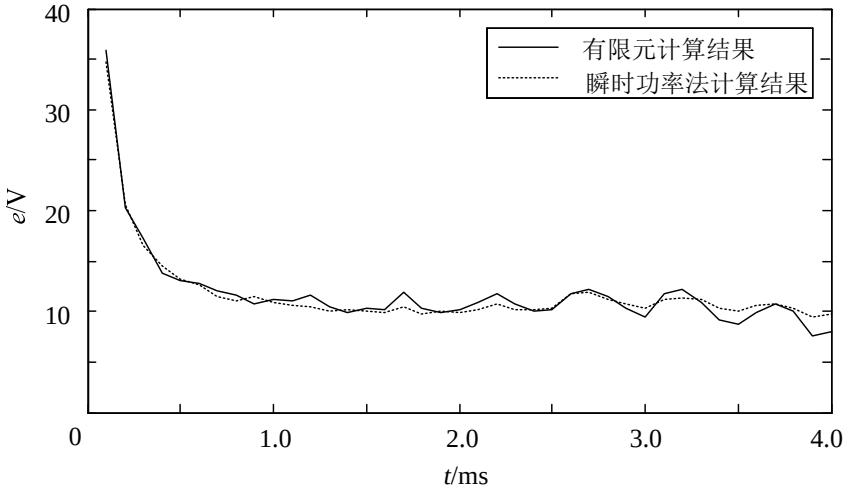


图 3-10　电磁气门驱动装置感应反电动势

关于电磁气门驱动装置中的感应反电动势的求解，除了利用瞬时功率法对感应反电动势进行估算外，可以参考电机中感应反电动势的计算方法，比较常见的是场路耦合法。场路耦合法经常被用于计算电机电磁场的瞬态过程。这种方法的求解变量一般是矢量磁位和回路电流，通过建立电机的瞬态电磁场与多回路耦合的数学模型，将电机的电磁场方程与反映绕组联接情况的电路方程联立起来同时

求解[44]。这种方法计算时需要考虑电机绕组的空间位置以及联接方式，把电机绕组的直线部分与端部分开考虑组成多回路模型，并考虑电机的磁极形状、齿槽影响、转子涡流、铁心饱和以及涡流效应等非线性因素。经实验验证，用场路耦合法来计算电机的暂态过程是比较准确的。

3.4 动子所受的力

永磁自锁型电磁气门在工作过程中，主要受到了电磁力 F_m，弹簧弹力 F_s、摩擦阻尼力 F_d、汽缸气流对气门的压力 F_f 等，受力分布情况如图 3-11 所示。

电磁驱动装置的机械运动方程式为

$$F_s + F_m + F_d + F_f = m\ddot{x} \tag{3-12}$$

式中，F_s——弹簧弹力，单位 N；

F_m——动子所受的电磁力，单位 N；

F_d——阻尼力，单位 N；

F_f——汽缸气流对气门的压力，单位 N；

$\ddot{x}$——为动子运动的加速度，单位 m/s^2；

m——动子总质量，单位 kg。

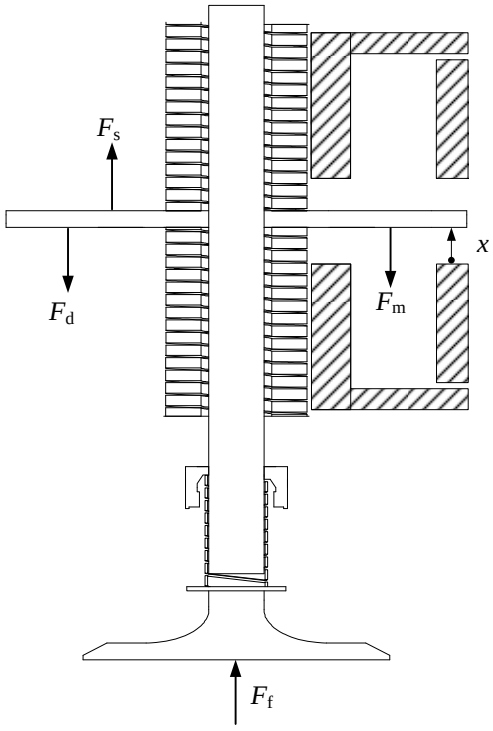


图 3-11　电磁气门机械子系统简化模型

规定气门完全开启时，即衔铁位于下止点时，为动子做直线运动的起始零点

x=0，则

$$F_s = 2k(0.004 - x) \tag{3-13}$$

式中，k——弹簧刚度系数，单位 N/m。

图 3-11 中动子所受到轴向电磁力 F_m 实际是由上、下两部分驱动装置分别产生的反向的电磁力 $F_{m'}$、F_m 的合力。而且，该电磁力又是由两种不同类型的力构成，一种是动子衔铁与内外铁心间的电磁吸力 F_{mr}；另一种是直线电机部分的轴向电动力 F_{mi}，即通电线圈与动子永磁体相互作用产生的安培力，即

$$F_m = F_{mr} + F_{mi} \tag{3-14}$$

式中，F_{mr}——电磁力，单位 N；

F_{mi}——电动力，单位 N。

动子所受到轴向电磁力是衡量永磁自锁型电磁气门驱动装置性能好坏的最重要的指标之一。它有以下几点特征：

（1）当线圈通入恒定的增磁电流时，动子所受到的电磁力随位移的增大而减小；

（2）当线圈通入增磁电流时，固定衔铁位置，逐渐减小电流，衔铁所受电磁力将逐渐减小；

（3）综合以上两点，当线圈通入增磁电流时，衔铁所受电磁力随线圈电流的增大而增大，随衔铁位移的增大而减小；

（4）当线圈通入去磁电流时，衔铁所受电磁力相对较小，甚至在特定电流、特定位移下，衔铁会受到排斥力。

以上四点结论可以通过电磁场仿真结果得到解释。

虽然电磁力是由上、下两部分电磁驱动装置共同合成，但是只有当衔铁和上、下驱动装置中的某一个装置之间的工作气隙较小时，电磁力受该装置的影响变化才比较大，受另外一装置的影响非常小，且在其它位置处电磁力受上、下两部分的影响变化都比较小。因此，为了分析方便，对电磁力仿真时可以先只考虑一个电磁驱动装置对动子的影响，对电磁力做定性分析。图 3-12 所示，为线圈通入不同大小、不同方向的电流（电流为正即为增磁电流、电流为负即为去磁电流），在不同的工作气隙下，动子所受到的下半部分电磁驱动装置的电磁力 F_m 情况。

由图 3-12 可以发现，若线圈电流 i 取恒定值，当工作气隙 x 较大时，动子受到的下半部分电磁驱动装置的电磁力 F_m 较小。这是因为，随着位移的增大，定子与衔铁间的气隙增大，定子与衔铁相互耦合的磁力线相对较少，因此衔铁与定子间的等效磁路磁阻 R_m 变大，磁通 φ 减小，最后导致电磁力 F_m 减小。若工作气隙 x 取恒定值，线圈通入增磁电流，定子与衔铁相互耦合的磁力线增多，衔铁收

到的电磁力也随之增大；线圈通入去磁电流，定子与衔铁相互耦合的磁力线减少，衔铁收到的电磁力也随之变小，且在电流达到某个临界值下，动子所受到的下半部分电磁驱动装置的电磁力 F_m 变为反向，即线圈磁场与永磁体磁场起到了相互排斥的作用，动子总体受到定子排斥力的作用动子，这一特性可以应用到电磁气门的释放和软着陆控制。

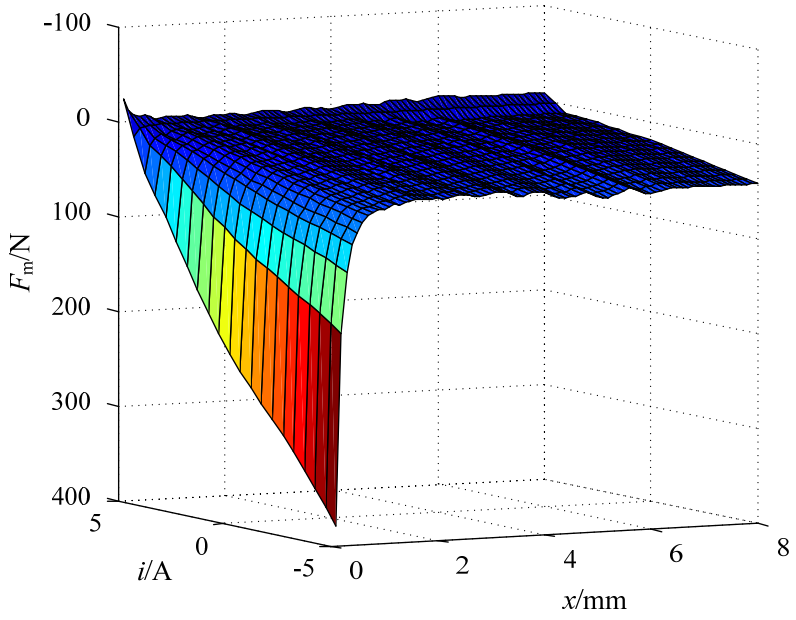


图 3-12　单个驱动装置的电磁力分布图

3.5 本章小结

在本章内容中，选择永磁自锁型电磁气门作为具体研究对象。整个 EMVA 可以认为是由电气、磁和机械三个相互耦合的系统组成。空载反电动势、电感、电磁力在三个子系统相互耦合关系中起着重要作用。

空载反电动势 e 是驱动控制系统最为关心的重要参数之一，可通过有限元法结合瞬时功率法求得。当位移（即衔铁与内外铁心间工作气隙）较小时，永磁磁路磁阻较小，线圈交链的永磁磁链较大，e 也较大，此时的 e 是由永磁磁场随位移变化和线圈切割永磁磁场产生的。当位移变的较大后，永磁磁路磁阻和磁密变化缓慢，e 也较小，此时的 e 主要由线圈切割永磁磁场产生。

线圈电感也是驱动控制系统最为关心的重要参数，它可通过能量摄动法线性化分析求得。电感随位移基本呈线性变化，只是在吸合位置附近迅速上升。电感这种变化趋势的原因是由于衔铁接近吸合位置时，磁路磁阻减小，磁感应强度快速增高，电磁机构的磁场储能随之增加，必然导致电感迅速变大。

电磁力是评定电磁气门驱动系统性能好坏的重要参考量。动子所受到轴向电磁力 F_{m} 是由两个力构成的，一个是动子衔铁与内外铁心间的电磁吸力 F_{mr}；另一个是直线电机部分的轴向电动力 F_{mi}，即通电线圈与动子永磁体相互作用产生的安培力。

三个参数确定后，为接下来的驱动控制系统中控制策略的可行性和有效性奠定了直接的理论基础。

第四章 永磁自锁型电磁气门驱动装置的仿真分析

4.1 引言

众所周知，气门在汽车内燃机中起着能量传递的作用。随着工业发展的加速，如何更充分地发挥气门的作用愈发受人关注。近十年来，电磁驱动气门装置凭借其结构简单、空间体积小以及节能、高效等诸多优点，国内、外许多科研人员对其开展了深入研究。随着永磁体在电气传动领域的不断推广和应用，在电磁气门驱动装置中安装永磁体的想法现在也得以了实现。永磁体的添设，可以实现在驱动线圈不通电的情况下而气门仍可自锁的功能，减少了耗电，同时也提高了燃油效率，符合当今我国节能、减排的基本国策和能源发展战略。

本章节的主要内容就是对永磁自锁型电磁气门驱动装置进行了有限元分析。首先，将上、下对置的两套驱动机构的下半部分驱动机构作为分析对象，对电磁气门的动态性能进行定性分析；然后，考虑到上、下两套驱动机构之间的相互作用，又对电磁气门的动态性能进行了定量分析。通过仿真实验，验证了所提出的永磁保持型电磁气门驱动装置结构的合理性和可行性。

4.2 电磁场的有限元分析法

电磁场的有限元分析法，常被用来当作对电磁场进行分析的计算机仿真工具。近些年随着限制计算机运行速度的各种半导体存储器和芯片等的迅速发展，计算机的处理速度日益提高，功能也日益强大。于是，有限元计算机分析软件也在应时得到了发展。通过计算机有限元分析软件来对电磁场进行仿真计算，不但可以省去人工计算所需的大量时间，并且准确，正逐渐地被认为是应用最为普遍、效果最为显著的一种数值解法。

目前，有限元法被广泛地应用在电机、机械结构设计等领域。在电机领域，主要可以在电机开发的前期研究阶段利用有限元法对其进行电磁场分析，通过仿真来预先实现各种性能要求苛刻的设计方案，设计者可综合比较众多设计方案来优化电机结构模型确定最佳方案。整个设计过程中，有限元法起直接指导作用。有限元法作为一种非常有效的现代分析方法，已成为对电机电磁场、热场以及多物理场的相互耦合进行准确分析和计算的强有力工具。

4.2.1 有限元分析法的起源和发展历程

1943 年，德国数学家理查德·柯朗（Richard Courant）首次提出了可以在定义域内分片地使用展开函数来表达其上的未知函数，即将区域分解为有限个三角形的子区域，用于求解来源于圣维男（st.Venant）圆柱体转矩问题的二阶椭圆偏微分方程[45]。柯朗绘制出了早期偏微分方程的研究结果，此求解方法即为最初的有限元分析法思想。二十世纪五十年代，飞机设计师发现复杂的航空结构使得传统的力学方法无法准确分析飞机的应力、应变等工程问题，于是波音公司的一个技术小组将连续的机体离散成三角形版块的集合体，通过一番波折后计算终于取得成功。这也是有限元法最早应用于工程实际的案例。五十年代中后期，有限元方法的机身和结构得到了分析及整合。1960 年，美国的克拉夫（R.W.Clough）教授在其平面弹性论文中提出了“有限元法”这个概念。值得提出的是，在 1965 年，中国的冯康教授发表了 《基于变分原理的差分格式》的论文著作，这篇论文也成为国际学术界承认我国独立发展有限元方法的主要依据。此后，“有限单元”这种叫法的被大家第一次当作一种概念名称普遍接受，有限元技术也由此正式诞生。1965 年，美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的温斯劳（A.M.Winslow）采用三角形有限元法对加速器磁铁饱和进行分析，并发表文章《Magnetic Field Calculation in an Irregular Triangular Mesh》，这是有限元法首次被应用于解决电气工程领域问题。接着到了 1969 年，加拿大的席尔凡斯特（P. Silveste）发表论文《High Oder Polynomial Triangular Finite Elements for Potensial Problems》，将有限元法推广应用于分析电机电磁场问题。1970 年 随着计算机和软件的发展，有限元技术也迅速发展起来，与传统的手算公式设计模式相比，提高了设计效率和计算精度。

经过半个多世纪的发展和在工程实际中的应用，以变分原理为基础建立起来的有限元法作为一种享有极高声誉的数值计算方法，已被证明是一种行之有效的工程问题的模拟仿真方法，并被普遍推广并成功地用于解决工业领域中的各种结构问题。在电气工程领域，有限元法也已逐渐成为对各类电磁场、电磁波工程问题进行定量分析、优化设计的主导数值计算方法。

4.2.2 有限元分析法的基本思想和原理

有限元法的基础是化整为零、集零为整的离散化思路。具体来说，有限元法的基本思想和原理就是将具有复杂几何形状的仿真对象模型离散化，使其成为由一组有限个单元的组合体，组合体各单元之间通过节点按照一定的方式相互连接。各单元的形状可以不同各，且单元组合时的连接方式也可不同，因此在求解

时，可以模拟成有限个不同几何形状的求解小区域，对各单元分别进行单独分析，最后再整体分析。由于计算时，将模型离散的单元和节点的个数都是有限的，故此方法就被称为有限元法。

电磁场问题通常情况下都可以被归类于一个偏微分方程的边值问题，但是有限元法分析并不是以偏微分方程为对象对其直接求解。一般把偏微分方程的边值问题作为出发点，设法得到一个通常被称作能量泛函的积分式，使其在边界条件得到满足的前提下取极值，即构成条件变分问题。事实上，这个条件变分问题与偏微分方程边值问题是相互等价的[46]。所以，在求解电磁场问题时，有限元法也可以看作是以条件变分问题为对象模型的。

有限元法在电磁场计算中是以变分原理和离散化思想为依托，来求取电磁场近似解。换而言之，在求解电磁场问题时，有限元法首先将所求的区域剖分，整体模型被剖分成有限多数量的网格或者单元，然后以连接各网格或单元的各节点为未知量，建立代数方程组进行求解，通过计算机可方便的得到这组庞大的代数方程组的函数解，即各节点处的函数值[47]。

综上可知，在实际分析的过程中，有限元法的求解思路是：首先，将所处理的对象模型剖分成有限多个数量的网格或者单元，各网格或单元之间通过节点按照一定的方式连接；然后，由矢量磁动势和标量电动势，求解每一单元（网格）和节点处在一定初始条件和边界条件下的磁动势或电动势，将结果保存在数据库中；后处理时，以数据库中保存的电动势和磁动势为基础，通过积分等数学运算，便可得到电磁场所关心的各种物理量，最常见的是磁力线分布、磁感应强度、电磁力矩、电感和电容等，其次还可以得到电位移通量、电磁场能量等的物理量。

4.2.3 有限元分析法的优点及其在工程实际中的应用

目前，最常见的电磁场数值分析法主要有有限元法、边界元法和有限差分法三种。这三种方法之中有限元法效果最好，且应用的最为广泛，因为它具有如下几个突出的优点：

（1）有限元方程组的系数矩阵具有正定、对称和稀疏性[48]。目前，在求解有限元的这种对称、正定矩阵方程组时，采用非零元素按行压缩存贮结合不完全乔累斯基分解共轭梯度法（ICCG法）的速度是较快的，这样可以节省计算机资源，提高计算速度。

（2）有限元法对于一些复杂的几何模型，可以先进行灵活地剖分处理，然后再分析、计算，非常方便，这对于分析具有复杂结构的工程产品有着明显优势。

（3）有限元特别擅长于处理具有多材料、多媒质分界面的电磁场问题，可以非常方便地处理类似于具有复杂形状永磁体的内部媒质交界条件，但却不能够

处理第二类齐次边界条件和不具有面电流密度的媒质交界条件[49]。

（4）有限元法的各个环节具有统一性，这样在计算过程中便于实现程序的标准化。因此，随着计算机技术的发展，一些功能齐全、便于操作的通用型有限元分析软件也已陆续被推了出来。

（5）有限元法对于非线性问题的处理也具有较好的效果。

随着现代科技的快速发展，人们不断地追求更为快速的交通工具、更为宏伟的建筑作品、更为高效的电机以及更为精密的机械设备。然而这一切工程和产品的设计，都需要工程师对其结构的力、温度场、电磁场、流场等技术参数进行准确的分析、计算。例如有限元法可用来分析建筑物的结构以预测地震对其所造成的破坏性影响，分析核反应堆的温度场以判断传热和冷却系统设计的合理性，分析电机的磁场分布以改善其工作性能，分析涡轮机叶片内的流体力学参数以提高其工作效率，等等。对这些常见的工程问题的求解进行常规的解析计算往往是不现实的，借助于有限元分析方法则成为解决这些复杂的工程计算的有效途径，尤其是近年来计算机技术的发展，使得有限元法在工程设计方面的应用得以快速的飞跃。在工程实践中，有限元方法的应用为设计师选取最优化方案提供了便利：

（1）设计功能在不断的完善，设计周期在缩短的同时，设计成本反而得到了节约；

（2）对工程产品进行分析的结果精确度高，可靠性好，可在制造之前发现产品潜在的问题，从而便于即时修改、优化模型，避免不必要的损失，降低了投入的成本；

（3）模拟、仿真各种不同的试验方案，便于从众多方案之中筛选出最优解，减少了实际试验所需的时间和避免不必要的经费投入。

有限元分析法正是凭借着以上诸多的优点，为许多国内外的研究单位、企业和高校所重视，它对工程产品的设计和优化提供了可靠而有效的参考依据，并且随着算法的不断成熟，也正在得到越来越广泛的应用[50]。

4.3 电磁气门驱动装置的动态模型有限元仿真分析和计算

目前，关于自锁型的电磁气门驱动装置，国内尚无相关报道，国外仅美国的GM 公司做过一个类似的项目，在该公司的项目里，永磁体是跟铁心固定在一起的，都属于静子的一部分，作用仅是在气门自锁的时候提供电磁力。将永磁体同动子衔铁固定在一起的动磁式永磁自锁型电磁气门驱动装置，属于一种创新、突破性的研究。也正是这个的原因，意味着对动磁式永磁自锁型电磁气门驱动装置的研究是一个复杂的、充满挑战的过程。为了获取电磁气门的参数，了解电磁气

门的性能，需要借助有限元分析法来对其不断地进行电磁分析，记录下电流、动子位移、电磁力等参数，并推算其变化规律。因此，对驱动装置结构的设计是一项重复性很强的工作，需要不断地修改模型、改变材料属性、调节励磁电流大小等等，然后进行数据收集、统计、分析、计算等一系列后续工作，为控制策略的制定做铺垫。

为了使仿真计算效果更加理想，在有限元仿真分析之前，先对电磁气门驱动装置的模型的建立作以下规定：

（1）在电磁气门驱动装置正常工作的情况下，忽略内、外铁心中的磁滞和涡流损耗；

（2）电磁气门驱动装置上、下对置结构中的线圈是相互独立的，不存在相互耦合的情况；

（3）电磁气门驱动装置中的内、外铁心里的磁导率是各向同性的，即材料是理想的、均匀分布的；

（4）电磁气门驱动装置中通入的电流在线圈导体中是均匀分布的，有限元分析时线圈电流可用面电流密度表示；

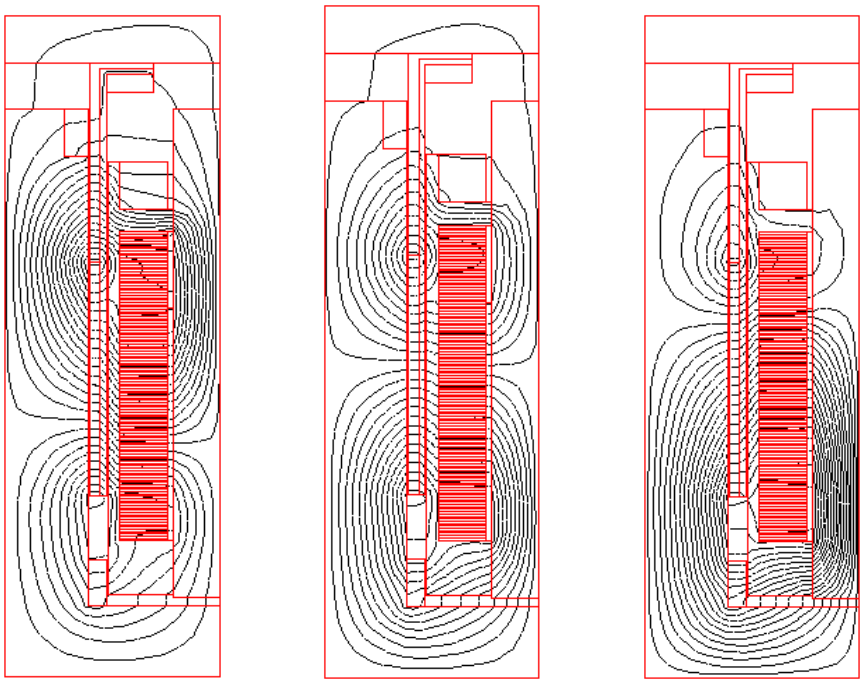
（5）气门在完全吸合状态下，衔铁和内、外铁心之间的工作气隙应保留有0.1mm 的余量。

利用有限元算法对电磁气门驱动装置进行设计是一种快捷、有效的方法，可以帮助设计人员快速地确定设计的思路与前进的方向，但是即便是严格按照规定进行仿真，最后取得的数据结果也可能与实际情况略有偏差。所以，可以根据改变某一结构参数后的仿真结果，来判断电磁力、电感、运动周期等关键数据的变化趋势。

4.3.1 单个电磁驱动装置的电磁力

上文曾提到过，虽然电磁力是由上、下两部分电磁驱动装置共同合成，但是只有当衔铁和上、下驱动装置中的某一个装置之间的工作气隙较小时，电磁力受该装置的影响变化才比较大，受另外一装置的影响非常小，且在其它位置处电磁力受上、下两部分的影响变化都比较小。因此，为了分析方便，对电磁力仿真时可以先只考虑一个电磁驱动装置对动子的影响，对电磁力做定性分析，然后再做定量分析。衔铁在中间平衡位置时的磁力线分布情况如图4-1所示。

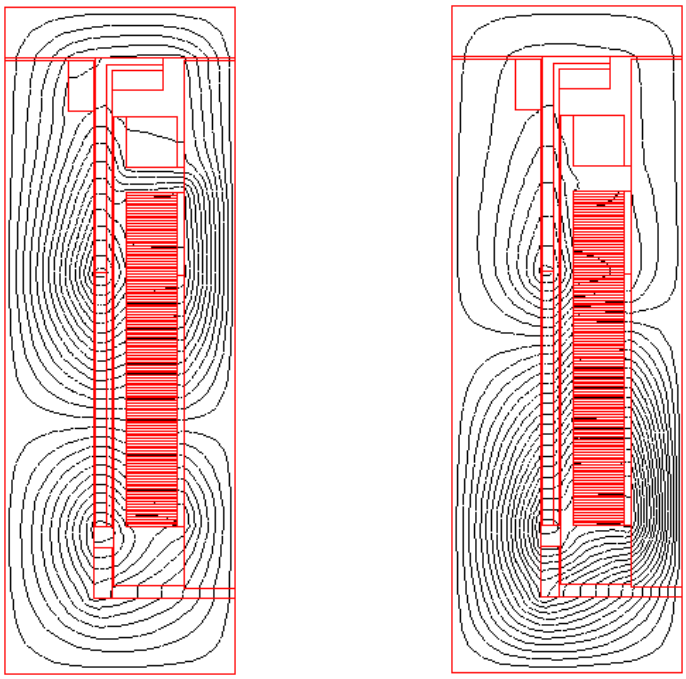
图 4-1(a)中线圈通入增磁电流，此时动子受到向下的吸合力；图 4-1(b)为线圈未通电时磁力线分布；图 4-1(c)中线圈通入去磁电流，此时动子受到向上的电磁推力。



(a) *i*=-5A　　(b) *i*=0A　　(c) *i*=5A

图 4-1　衔铁平衡位置下磁力线分布图

图 4-2 为衔铁在吸合状态下，线圈电流未通电自锁保持时和通入去磁电流时的磁力线分布图。结合图 3-12 可看出，电磁力在气门接近吸合状态时对气隙和电流的变化都非常敏感。



(a) *i*=0A，自锁保持　　(b) *i*=5A，解锁起动

图 4-2　衔铁吸合位置下磁力线分布图

图 4-3 为单个电磁驱动装置线圈通入不同电流时动子所受到电磁力 F_m 的曲线族。由图可见，增磁电流增大，F_m 增大；去磁电流增大，F_m 减小；同时，在吸合位置 x=0mm 附近，F_m 对气隙和电流的变化都非常敏感。

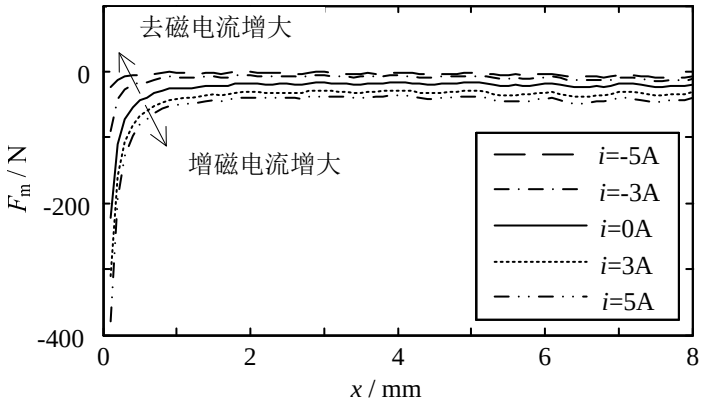


图 4-3　单个电磁驱动装置通入不同电流时的电磁力

结合图 4-1、图 4-2、图 4-3 可以看出，电磁力在气门接近吸合状态时对气隙和电流的变化都非常敏感。如果不能很好的掌握电磁力的变化规律，对于控制策略的选取和制定都是无法实施的。因此，电磁力的运动趋势对于研究永磁自锁型电磁气门驱动装置的性能来说非常的重要。

4.3.2 单个电磁驱动装置的电磁力的分解

电磁力是评定电磁气门驱动系统性能好坏的重要参考量。在永磁自锁型电磁气门驱动装置中，由于永磁体的引入，使得动子永磁磁场与静子内外铁心之间始终有相互力的作用。永磁体的作用不仅仅是在气门完全吸合或者完全开始时给气门提供自锁力，另一个主要的作用是在动子做直线往复运动时提供直线电机部分的轴向电动力。因此，动子在正常的工作状况下，其所受到轴向电磁力 F_m 实际上是由两个力合成的，一个力是动子衔铁与内外铁心间的电磁吸力 F_{mr}；另一个力是直线电机部分的轴向电动力 F_{mi}，即通电线圈与动子永磁体相互作用产生的安培力。

假设永磁磁场在衔铁与内外铁心气隙处产生的电磁吸力 F_{mr} 不受线圈电流的影响，近似认为系统可以使用叠加原理。于是，将线圈通电时动子所受的总电磁力 F_m，减去未通电时动子所受到的永磁磁场在衔铁与内外铁心间气隙处产生的电磁吸力 F_{mr}，即可等效看做该电流下直线电机产生的轴向电动力 F_{mi}。

图 4-4 即为由此得到线圈通入不同电流时直线电机部分产生的轴向电动力 F_{mi} 曲线族。由图得出以下结论

（1）通入增磁电流时，F_{mi} 为负，即动子受到向下的拉力；

（2）当线圈通入去磁电流时，F_{mi} 为正，即动子受到向上的推力，这与安培定则也是完全吻合。同时可以看出来，在工作气隙较小时，电动力变化也非常的敏感。

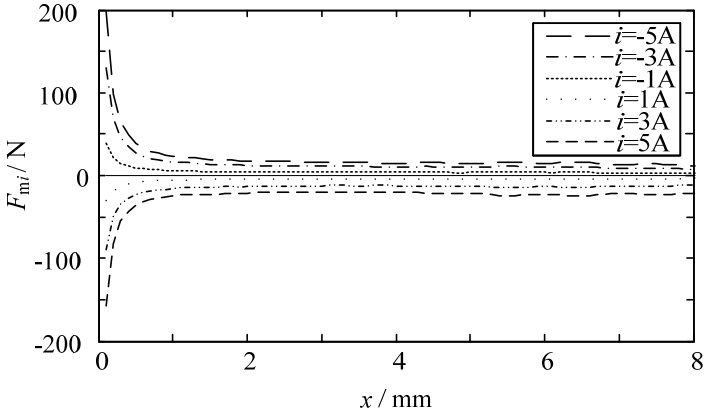


图 4-4　单个电磁驱动装置直线电机部分产生的轴向电动力

4.3.3 上下对置的两个电磁驱动机构的电磁力

实际中，由于电磁气门驱动装置为上、下对置的几乎完全对称的结构，无论装置中的两线圈通电与否，两永磁体产生的磁场始终对动子都有力的作用，故计算动子所受到的总电磁力时需考虑上、下两部分驱动装置的共同作用。设图 4-5 所示电磁驱动装置中的下线圈电流为 i_a，上线圈电流为 i_b。线圈电流为正时，该通电线圈所在的那一个驱动装置的内外铁心和衔铁间的工作气隙处永磁磁场得到增强。同理，线圈电流为负时则工作气隙处永磁磁场被削弱。图 4-5 为一个单行程中，上、下两个线圈通入几个典型电流时动子所受到的总电磁力 F_{2m} 曲线族。

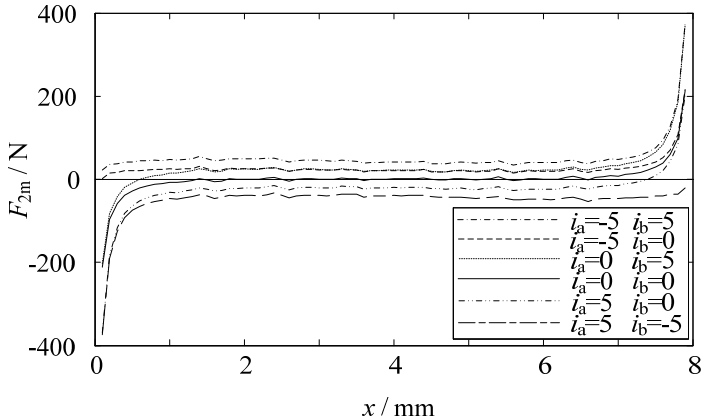


图 4-5　动子所受到的总电磁力 F_{2m}

由图 4-5 可以看出，在动子处于上止点或下止点附近时，即动子位移 $x\in(1, 0)$ 和 $x\in(7, 8)$间，衔铁与内外铁心间气隙较小那一侧的线圈的通电可以大幅度改变

该侧电磁力大小；通增磁电流加速自锁，通一定的去磁电流就能解锁。

当衔铁与内外铁心间的工作气隙较大，即动子位移 $x\in(1,7)$间时，总电磁力主要是直线电机部分产生的轴向电动力，线圈电流的大小和方向决定着总电磁力的大小和方向。观察图 13 中动子位移 $x\in(1,7)$间各条曲线，由(i_a=0, i_b=0)时曲线可知，两个线圈都不通电时动子所受到的总电磁力几乎为零；由(i_a=0, i_b=5A)和(i_a=-5A, i_b=0)时两条曲线可知，一个线圈通电时，动子所受到的总电磁力与通电线圈所属直线电机部分的轴向电动力方向一致；由(i_a=-5A, i_b=5A)时曲线可知，一线圈通增磁电流、另一线圈通去磁电流，动子受到的两个轴向电动力方向一致，总电磁力最大。

4.4 本章小结

电磁力是评定电磁气门驱动系统性能好坏的重要参考量，本章主要对永磁自锁型电磁气门驱动装置进行了有限元分析。首先，简单介绍了有限元分析法的基本思想和原理，及其在工程实际中的应用。其次，以电磁气门驱动装置作为具体研究对象，对该系统上、下对置的机构的电磁场分别进行了定量、定性的有限元分析。

在永磁自锁型电磁气门驱动装置中，由于永磁体的引入，使得动子永磁磁场与静子内外铁心之间始终有相互力的作用。永磁体的作用不仅仅是在气门完全吸合或者完全开始时给气门提供自锁力，另一个主要的作用是在动子做直线往复运动时提供直线电机部分的轴向电动力。在气门正常工作之时，动子所受到轴向电磁力 F_m 是由两个力合成的，一个是动子衔铁与内外铁心间的电磁吸力 F_{mr}；另一个是直线电机部分的轴向电动力 F_{mi}，即通电线圈与动子永磁体相互作用产生的安培力。

电磁力虽然是由上、下两部分电磁驱动装置共同合成，但是只有当衔铁和上、下驱动装置中的某一个装置之间的工作气隙较小时，电磁力受该装置的影响变化才比较大，受另外一装置的影响非常小，且在其它位置处电磁力受上、下两部分的影响变化都比较小。因此，可先只考虑单个电磁驱动装置对动子的影响，对电磁力做定性分析。

最后，综合需考虑上、下两部分驱动装置的共同作用，对电磁力做定量分析，动子所受到的总电磁力 F_{2m} 的变化规律大致为

（1）当动子处于上止点或下止点附近时，即衔铁与内外铁心间的工作气隙较小时，总电磁力主要是衔铁与内外铁心之间工作气隙处的电磁吸力。

（2）当衔铁与内外铁心间的工作气隙较大，总电磁力主要是直线电机部分

产生的轴向电动力，线圈电流的大小和方向决定着总电磁力的大小和方向。

电磁力在气门接近吸合状态时对气隙和电流的变化都非常敏感。如果不能很好的掌握电磁力的变化规律，对于控制策略的选取和制定都是无法实施的。因此，电磁力的运动趋势对于研究永磁自锁型电磁气门驱动装置的性能来说非常的重要。

第五章 总 结

电磁气门驱动装置在近些年来所受到的关注和重视程度日益增加，逐渐成为了各国科技人员的一个研究热点。它是可变气门正时技术的最新研究方向，采用它后取消了传统内燃机复杂的凸轮连杆装置，利用电磁力直接驱动气门的开启和关闭，减小了摩擦损耗，实现了节能减排。

实际上，普通的电磁气门并没有达到理想的节能效果。因为汽车动力所必须的燃料和充分的燃烧，是依靠气门不断的开启、关闭来保障的。内燃机低速运行时，气门开启保持和闭合保持的时间甚至可能比运动过程的时间还长。目前普通的双弹簧、双线圈的电磁气门驱动装置中，气门开启和闭合的保持时，只能依靠线圈持续通电达到电磁力和弹簧弹力的平衡，而处于保持状态。这样，不但产生电能损失，而且容易使线圈发热，影响电磁气门的性能。鉴于此，本课题提出一种全新的永磁自锁型电磁气门驱动装置，在传统双弹簧、双电磁铁电磁气门驱动机构的基础上引入永磁体，利用永磁体在气门完全关闭或完全开启的状态下提供的电磁力实现自锁，气门保持在全开或全闭的位置时线圈不必通电。气门解锁时只需在自锁侧线圈通入起去磁作用的电流。同时

在对电磁气门驱动装置进行结构设计时，首先应该确定的是弹簧的刚度系数。因为气门运动周期和弹簧的最大压缩长度即气门的行程由内燃机决定，是已知的。气门的最高往返频率取决于内燃机最佳循环周期。气门由开启到闭合或者由闭合到开启时，弹簧-气门运动系统基本处于简谐振荡状态，每次动作的时间基本上就是运动系统固有振荡周期的二分之一。两个刚度系数皆为 k 的弹簧并联，其固有振荡周期为$T=2\pi\sqrt{m/(2k)}$ 。因此，动子质量一旦确定下来，弹簧刚度系数也就确定了，电磁驱动装置的自锁保持力也就确定了。

弹簧只是储能元件，若不计损耗，且整个行程不通电，则落座速度应刚好为零。实际上，摩擦和气缸阻力会产生能量损失。由于线圈电感存在，电流响应较慢，气门运动时永磁直线电机部分的电动力与弹簧力相比是较小，线圈电流大小对气门的运动速度影响不大；但气门运动时线圈通电却能为运动部件补充能量，弥补运动过程中的能量损失，使气门顺利到达目标位置，并且平稳落座，这正是直线电机部分提供轴向电动力的重要性所在。

线圈电感可通过能量摄动法求解。工作气隙较小时，线圈电感与位移呈非线性关系；工作气隙较大时，电感与位移基本呈线性关系。

改变永磁体长度，调节内外铁心间附加磁气隙δ'，都可以改变气门自锁保持

力的大小，是改善电磁机构工作气隙永磁磁场性能重要手段。

要综合考虑永磁体长度和内外铁心间附加磁气隙大小，既保障自锁时有较大电磁吸力，还要确保动子运动时直线电机部分有足够的轴向电动力。

衔铁与内外铁心间气隙较大时，气门所受到的总电磁力基本上是直线电机部分的轴向电动力。

电磁气门驱动装置可以通过控制器在最佳时刻发出信号，使得气门的开启和关闭得到灵活地控制，因此保障了燃油比、燃烧效率，节能性能良好，有广阔的发展前景。

参考文献

[1] Chun Tai, Tsao T C. Adaptive nonlinear feedforward control of an electrohydraulic camless valvetrain[C]. Proceedings of the American Control Conference, Chicago, United States of America, June 28-30, 2000.

[2] Ong C M. Dynamic simulation of electric machinery[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1997.

[3] Peter Eyabi, Gregory Washington. Modeling and sensorless control of an electromagnetic actuator[J]. Mechatronics, 2006, 16(3): 159-175.

[4] 严兆大，王希珍，李莉，等．电磁控制全可变气门系统及其仿真[J]．内燃机工程，2002，23(4)：10-12．

[5] 吴亚楠，赵雨东，汪波，等．发动机电磁气门驱动动态特性试验研究[J]．内燃机工程，2003，24(5)：9-13．

[6] Katherine S P, Anna G S. Extremum seeking control for soft landing of an electromechanical valve actuator[J]. Automatica, 2004, 40(6): 1063-1069.

[7] Chun Tai, Tsao T C. Control of an electromechanical actuator for Camless engines[C]. Proceedings of the American Control Conference, Denver, United States of America, June 4-6, 2003.

[8] 李莉．电磁全可变气门的仿真控制及相关研究[D]．浙江：浙江大学，2004．

[9] Chun Tai, Andrew Stubbs, Tsu C T. Modeling and controller design of an electromagnetic engine valve[C]. Proceedings of the American Control Conference, Arlington, United States of America, August 25-27, 2001.

[10] 王希珍，李莉，严兆大，等．基于仿真基础上的电磁控制全可变气门系统优越性的分析[J]．内燃机工程，2004，25(1)：31-34．

[11] Ryan R C. Modeling and control of automotive gas exchange valve solenoid actuator[D]. Edmonton: University of Alberta, 2007.

[12] M Pischinger, W Salber, F Staay, *et al*. Benefits of the electromechanical valve train in vehicle operation[C]. SAE 2000 World Congress, Detroit, United States of America, March 6-9, 2000.

[13] Parlikar T A, Chang W S, Qiu Y H, *et al*. Design and experimental implementation of an electromagnetic engine valve drive[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2005, 10(5): 482-494.

[14] Katsuhiko Ogata. Modern control engineering[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

[15] 李莉，王希珍，严兆大，等．电磁驱动气门机构系统模型[J]．内燃机工程，2004，25(4)：11-14，19．

[16] 赵雨东，吴亚楠，付雨民，等．发动机电磁气门驱动设计试验与仿真[J]．清华大学学报，2003，43(5)：698-701．

[17] Soon K C, Galileo Galilei. Flatness-based end-control of a gas exchange solenoid actuator for IC engines [D]. Edmonton: University of Alberta, 2005.

[18] Chun M T. Approach control of a gas exchange solenoid actuator for IC engines[D]. Burnaby: Simon Fraser University, 2007.

[19] Jan Rens, Richard E C, Geraint W J. Static performance of a polarized permanent-magnet reluctance actuator for internal combustion engine valve actuation[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(8): 2063-2070.

[20] Gennaro S D, Toledo B C, Benedetto M D D. Nonlinear regulation of electromagnetic valves for camless engines[C]. Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control, San Diego, United States of America, December 13-15, 2006.

[21] 李红艳，赵雨东．发动机无凸轮轴气门驱动的研究与进展[J]．车用发动机，2001，4(2)：1-5．

[22] Haskara İ, Kokotovic V V, Mianzo L A. Control of an electro-mechanical valve actuator for a camless engine[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2004, 14(6): 561-579.

[23] Noah H S. Design and validation of a proportional throttle valve system for liquid-fuel active combustion control[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.

[24] Jinho Kim, Lieu D K. Designs for a new, quick-Response, latching electromagnetic valve[C]. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, San Antonio, United States of America, May 15-15, 2005.

[25] 赵雨东，李红艳，陆际清．电磁气门驱动设计及其电磁铁静吸力特性试验[J]．内燃机学报，2002，20(4)：339-344．

[26] 张育华，刘波，胡国栋．内燃机采用电磁驱动气门机构的探索[J]．内燃机学报，1988，6(1)：90-91．

[27] 陈似竹，赵雨东．发动机电磁气门驱动动态仿真与分析[J]．中国机械工程，2007，18(14)：1751-1756．

[28] 王秋华，赵雨东，付雨民．发动机电磁气门驱动有限元法仿真计算[J]．车用发动机，2006，8(4)：35-38．

[29] 陈似竹，赵雨东，付雨民．发动机电磁气门驱动中的电磁铁结构方案介析[J]．车用发动机，2003，6(3)：25-34．

[30] 金华民，赵雨东，陈似竹．发动机电磁气门驱动(EVA)机构的设计及试验[J]．小型内燃机与摩托车，2007，36 (2)：27-31．

[31] 黄荣纬，赵雨东，陈似竹．发动机电磁气门驱动中的电磁铁特性分析[J]．内燃机工程，2007，28(2)：31-34．

[32] 王希珍．电磁驱动气门机构的设计开发和试验研究[D]．浙江：浙江大学，2003．

[33] 李路路．电磁驱动气门的有限元分析[D]．南京：南京理工大学，2009．

[34] Masaki U, Hideyuki H, Ryohei M, *et al*. Sliding mode servo control with feedforward compensation for electromagnetic engine valve[C]. Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Xi'an, China, July 2-5, 2008.

[35] Liu L, Chang S Q. A Moving Coil Electromagnetic Valve Actuator for Camless Engines[C]. Proceedings ofthe 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun, China, August 9-12, 2009.

[36] 冯迎霞，俞水良．车用发动机可变气门驱动技术进展[J]．机电工程技术，2005，1 (1)：22-25．

[37] 唐任远．现代永磁电机理论与设计[M]．北京：机械工业出版社，2002.

[38] 陈益广，王颖，沈勇环，等．宽调速可控磁通永磁同步电机磁路设计和有限元分析[J]．中国电机工程学报，2005，25(20)：157-161.

[39] 傅红良，林运．气门弹簧特性对配气机构的影响[J]．柴油机设计与制造，2007，15(3)：24-28．

[40] 谢英俊，娄相芽，金波，等．电液可变气门高速开关阀用电磁铁设计与研究[J]．工程设计学报，2010，17(2)：138-145．

[41] 夏永明，卢琴芬，叶云岳，等．新型双定子横向磁通直线振荡电机[J]．中国电机工程学报，2007，27(27)：104-107.

[42] 王群京，陈军，姜卫东，等．一种新型混合励磁爪极发电机的建模和计算[J]．中国电机工程学报，2003，23(2)：67-70, 76.

[43] 王爱龙，熊光煜．无刷双馈电机电感参数的计算[J]．中国电机工程学报，2009，29(9)：93~97.

[44] 孙宇光，王祥珩，桂林，等．场路耦合法计算同步发电机定子绕组内部故障的暂态过程[J]．中国电机工程学报，2004，24(1)：136-141．

[45] 冯慈璋，马西奎．工程电磁场导论[M]．北京：高等教育出版社，2000．

[46] 盛剑霓．工程电磁场数值分析[M]．西安：西安交通大学出版社，1991.

[47] 赵维友．磁通反向式电机齿槽转矩削弱方法的研究[D]．天津：天津大学，2007．

[48] 王颖. 内置混合式转子结构可控磁通永磁同步电机的分析与控制[D]. 天津：天津大学，2006．

[49] 胡之光．电机电磁场的分析与计算[M]．北京：机械工业出版社，1989.

[50] 辜承林，陈乔夫．电机学[M]．湖北：华中科技大学出版社，2005.

发表论文和科研情况说明

发表的论文：

[1] 陈益广，郭喜彬，唐明龙，张明灿. 一种永磁自锁型电磁气门驱动装置. 微特电机，已录用.

参与的科研项目：

本人参与了横向课题项目“受迫振动直线发电系统电控装置研制”。

致 谢

时间荏苒，岁月如梭，转眼间两年半的硕士研究生学习生涯已经接近尾声。在攻读硕士期间，导师陈益广教授的言传身教让我终身受用。学习上，陈老师在传授知识和学问的过程中严密谨慎，经常教导我们在科研和学术问题方面要具有踏实认真的态度和实事求是的精神。生活上，陈老师为人随和，待人热忱，经常对我们嘘寒问暖，关怀备至，成为我学习的榜样。陈老师为我们营造了良好的学术氛围，使得我们可以去轻松、愉快地开展研究工作，所获颇丰，受益良多。在此，特向尊敬的陈老师表达深深的谢意和崇高的敬意。

衷心地感谢天津市蹊径动力技术有限公司对本课题的大力资助，以及唐明龙高级工程师对研究工作的指导。

感谢夏长亮教授、王晓远教授、么莉副教授和李斌副教授，他们严谨的治学态度、广博的学识，成为我学习的楷模、成长的目标。

感谢师兄贺鑫、胡跃伟、欧阳桂泉和师姐潘玉玲为实验室所营造出的和谐、轻松的学习氛围，同时在科研、生活、工作方面对我的耐心指点。感谢同实验室的张明灿、周华和李增贺在两年中给予我的热情帮助，使得我可以顺利完成硕士期间的各项工作。感谢所有师弟、师妹在科研工作中给我提供的大量帮助，以及生活中对我的关心，同时祝你们前程似锦。

感谢父母为我所提供的强有力的经济支柱，消除了我经济上的后顾之忧，使我可以全身心的投入学习生活中。他们一路来对我的无私奉献和坚定支持，是我奋斗拼搏的动力。希望能运用所学知识来创造更多的财富，以此来报答我的家人。

最后感谢所有给予支持和帮助的老师和朋友。

郭喜彬

2011 年 12 月 3 日